Journal of Research on Archaeometry, 2022; 8 (1): 185-205

Journal of Research on Archaeometry

DOI: 10.52547/jra.8.1.185

URL: https://jra-tabriziau.ir/

Reviwe Paper

An Overview of the Structure, Application, Production Process and Effects of Additives in Traditional Gypsum Mortar

Hamed Yaqubzadeh [1], Mehdi Razani [* 2]

[1]. MA in restoration of cultural and historical objects, Faculty of Cultural Materials Conservation, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, IRAN

[2]. Associate Professor, Faculty of Cultural Materials Conservation, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, IRAN

Received: 19/04/2022 **Accepted: 16/07/2022**

Abstract

Mortars are an integral part of historical and even modern constructions, used in different parts of their structure. Therefore, putting up a building with high quality and durability calls for attempts to enhance the quality of mortars and building materials. Generally speaking, the foremost factors responsible for the changing properties of gypsum mortars are the type of mineral deposit, the baking manner, and the additives. Thus, the present paper aimed to overview the effects of these factors on mortar properties. In studies such as this library research will be the only possible research approach to adopt. Given the distribution of gypsum deposits over diverse landscapes, the first factor affecting the properties of gypsum is the type of mine which is governed by its surrounding environment. In particular, different mines will provide gypsums with varying impurities and crystal growth conditions, which in turn will give mortars with distinctive properties. Baking method and additives will likewise affect the structure of the resultant mortars in some way. Therefore, controlling each of these factors will bring about certain variations in crystal morphology and intracrystalline space, thereby causing differences in the properties of gypsum mortars.

Keywords: Crystal, Mortar, Gypsum, Additive, Mine, Temperature, Historic buildings.

*Corresponding Author: m.razani@tabriziau.ac.ir

Introduction

Notwithstanding the various definitions advanced in different sources, mortar in general can be defined as a workable paste that binds building materials or is used as a main building material such as coating and plaster [1-3]. Mortar with gypsum binder is considered the most common restoration material in the preservation of architectural decorations. Therefore, structural study of the factors responsible for different properties of gypsum mortars and the ways of enhancing gypsum with the aim of more effective conservation of buildings and monuments is essential. Because, apart from its advantageous features such as good plasticity, gypsum has a series of disadvantages, most notable among them being the low resistance to moisture. To control and optimize a mortar, several points should be considered:

A. The mineral deposit, which directly affects the quality of gypsum mortar, and hence in different mines gypsum sedimentary minerals are formed under different conditions;
B. How gypsum is baked, as a different phase of gypsum will form from the varying heating temperature, which has an important effect on such qualitative factors as setting time;
C. Additives, which have been used in historical mortars throughout history and mentioned in early textual sources, and cause changes in the quality of mortars [1-3].

Accordingly, the purpose of this review paper is to furnish a short overview on mortars and the factors affecting the properties of gypsum mortars for use in the field of conservation and restoration of historical monuments.

Literature Review

History and application of mortars

The use of mortars for construction purposes has a long history, as is evidenced by gypsum-limestone mortars attested in Göbekli Tepe of Turkey and other centers in the Middle East dating to the seventh and eighth millennium BC. This extended history has led to the emergence of a wide variety of mortars, and over time architects have gained knowledge about the properties of mortars and their use in different parts of buildings. Notably, the mortar used in brick bonds is different from the one used as plaster to coat wall surfaces. This even has a bearing on the type of binder that is selected, so that in such buildings as bathhouses that are in direct contact with moisture, hydraulic lime will be the most suitable mortar, a fact that illustrates application of different mortars in different parts of the building [4-8]. Over time, additives also began to play an essential part in determining the properties of mortars. For example, Chardin alludes to the use of mica as an additive to brighten gypsum mortars used for plastering [4].

Gypsum Structure

Gaining an understanding of the structure of gypsum is central to any examination of the influencing factors, and the effects of additives and gypsum processing on the properties of the final mortar. In general, to investigate the structure of plaster in this research, the main focus will be on the morphology and the inner crystals of the minerals. In the inner part of the gypsum crystal, the constituent elements include calcium, sulfur, oxygen and hydrogen, and the arrangement of these elements within the crystal will be determined by the different phases of gypsum such as anhydrite or basanite. This internal morphology and arrangement will in turn give shape to the outer crystal. The latter may also affect the inner crystal shape and structure through the conditions of the mineral deposit (such as the pressure exerted on the crystals, the temperature of the mine). Apart from the conditions of the deposit, factors such as crystal growth, twinning, and structural defects in crystals also have a bearing on the shape of the crystal. Figure 1 presents a good guide for determining the shape of crystals based on the crystal growth and twinning. The way gypsum is baked in the kiln and the nature of additives will also affect the shape of the crystals, leading to varying properties of the gypsum mortar [9-26].

Effective Factors in Varied Properties of Mortars

The main factor in determining the properties of mortars is the binder, which may consist of materials such as plaster or lime. Due to the widespread use of mortar with plaster binder, the main focus of the present study will be on these materials. In general, the type of mineral deposit, the baking method, and additives (Figure 2) are the main factors determining the properties of gypsum mortars.

The influence of the conditions of the mineral deposit along with gypsum' structure have already been explained to some extent. Therefore, the two remaining factors will be explicated in the following sections.

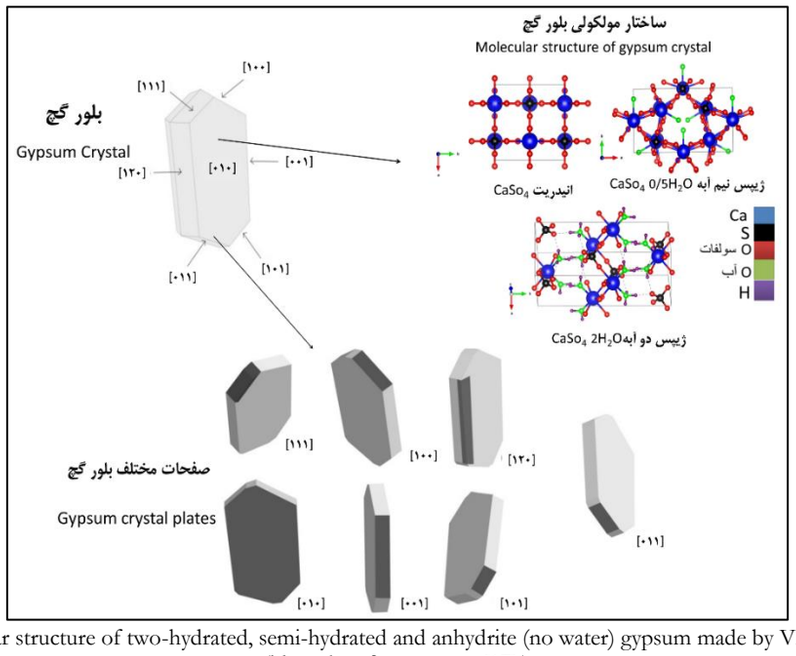


Fig. 1: Molecular structure of two-hydrated, semi-hydrated and anhydrite (no water) gypsum made by VESTA software (idea taken from source [17].)

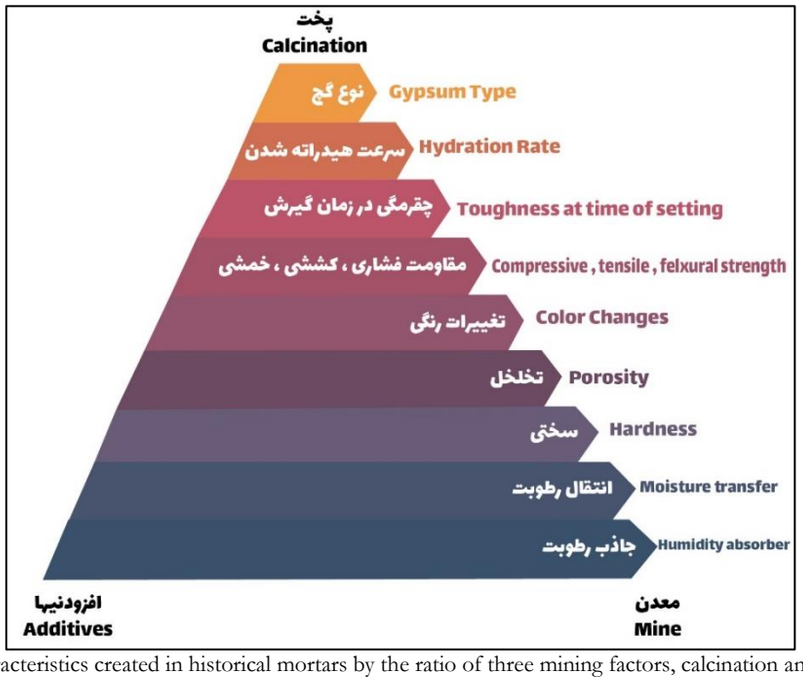


Fig. 2: Characteristics created in historical mortars by the ratio of three mining factors, calcination and additives

Gypsum processing

Ore extraction, calcination, cooling, sieving and crushing, adding additives and fillers, and finally adding water are the main stages that make up the processing of a gypsum mortar (Figure 3). Each of these discrete stages will strongly affect the properties of the resultant mortar. For example, baking and calcining at different temperatures will produce different phases of gypsum (Figure 4). A further example is the crushing of the calcined gypsum, in that different sizes of pulverized gypsum particles will cause variations in the properties of the final mortar [29,30, 37,38,39].

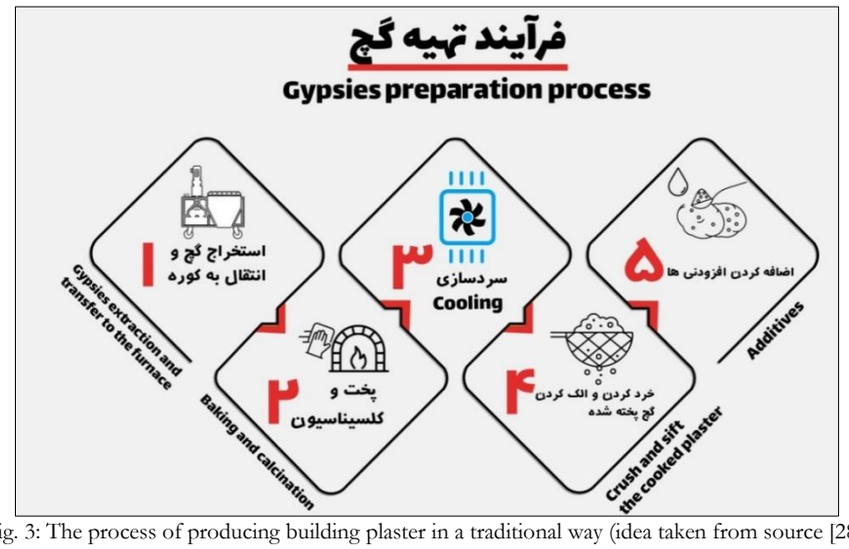


Fig. 3: The process of producing building plaster in a traditional way (idea taken from source [28])

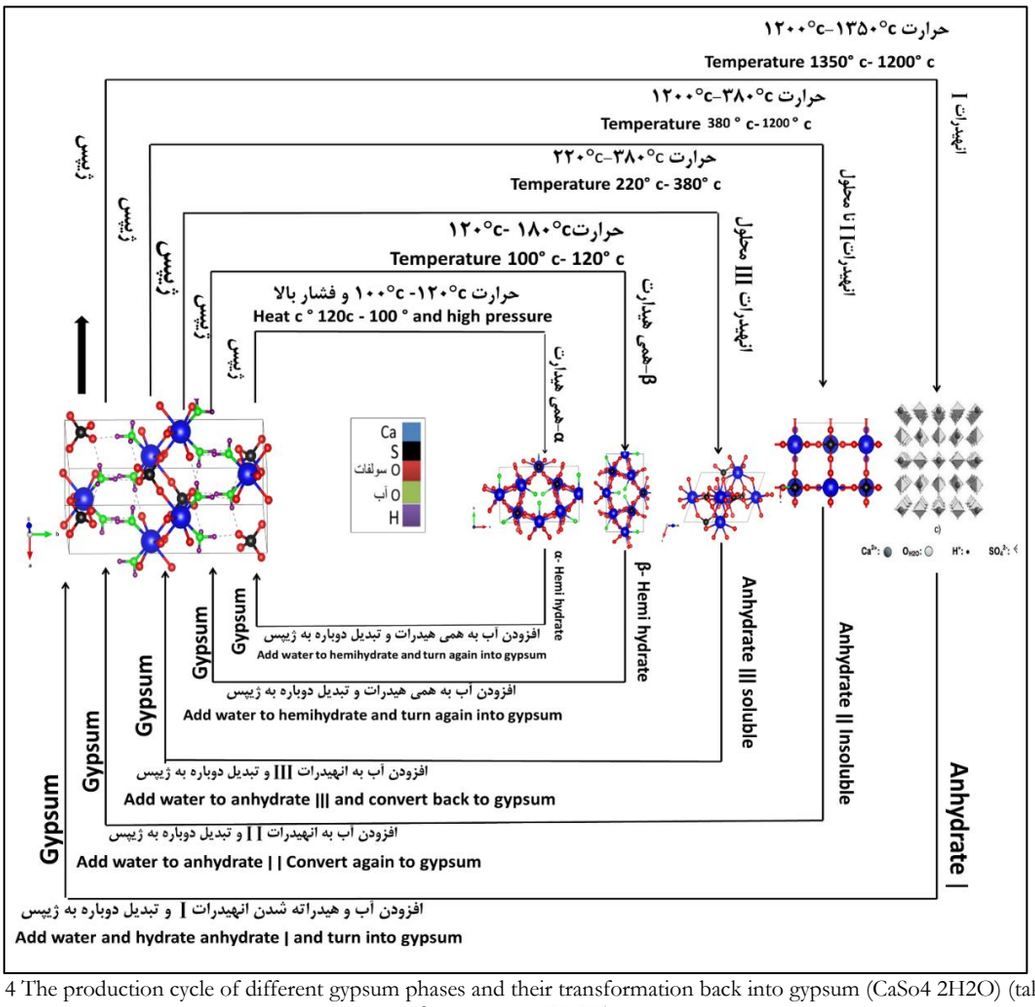


Fig. 4 The production cycle of different gypsum phases and their transformation back into gypsum (CaSo4 2H2O) (taken from sources [30-33])

Introducing traditional additives in historical mortars

ISO 6707-1:20201 defines mortar as a material comprised of a combination of a binder, fillers, and water. This statement can properly justify the existence of mortars made from different compounds so as to enhance the efficiency of mortar besides alleviating inherent weaknesses of materials such as lime and gypsum. Before proceeding to introduce the additives used in historical mortars, giving a definition of the term "additive" might be helpful: an additive in a mortar is a very small amount of

substance added to the main composition of mortar to change or improve its properties. According to this definition, milk, casein, egg white and yolk, animal glues, beeswax, urea, plant fibers, magnesium compounds and even pozzolanic materials are the commonly used additives in mortars [40-43]. Apart from the description of ancient additives, examples of practical applications of each additive in buildings and other relics are presented. For instance, the casein content in the statues made of mortar was added as a patina. Table 1 outlines the additives recorded in historical buildings.

Table 1: introducing some additives used in historical mortars

A case example in historical works	An example of additives	Additive type
Limestone mortar of Chinarminar building, India[62] Mortar of Padmanabhapuram Palace, India[63]. Solupar Fort, India] 64[	carbohydrates)such as palm tree and aloe vera(	Organic materials
The mortar of the Church of the Holy Cross in Gersa in Jordan [65], the plaster mortar of Khwaja Zainuddin Uzbekistan [66]. Plaster works of the Italian Renaissance period in the Strasbourg Museum and Paris Louvre] 67[	Proteins (such as Animal glue and albumin)	
Mortar of historical monuments of the Ming and Song periods in China [68], the mortar of the]69[Amalfi shipyard in Italy	Oils and gums)linseed oil and gum(	
India's Dolatabad Castle[70] Spain's Amour Castle]71[Reservoir	Metal oxides (such as hematite)	minerals
Mortar of Pouncey Castle, England]61[	non-metals (such as brick-pottery chips)	

Effects of modern additives on historical mortars

Effects of additives on mortars may include resistance effects, changes in water absorption rate, toughness, water absorption speed (hydration), and consolidation in restoration operations. For that reason, this section considers the effects of additives on mortars. For instance, acrylic polymers have proved to act as an acceptable stabilizer for gypsum mortars, or adding such substances as lime nanoparticles improves their strength properties. Table 2[44-84] presents the effects of different additives.

Table 2: Introduction of some additives for mortars and their effect on mortar

time consuming	Water absorption rate	Hydration rate	Lubricant	Resistant impact	Stabilizer	**Additives**
_____	De	_____	±	In	±	**Acrylic polymers**
_____	_____	_____	_____	In	+	**Silca gels**
_____	De	_____	_____	In	+	**Lime nanoparticles**
	De	_____	+	In	_____	**Latexes**
In	_____	De	_____	In	_____	**pva**
PIn	De	PDe	_____	In	_____	**black tea**
In	_____	De	_____	_____	_____	**salt**
_____	De	_____	-	In	_____	**Sand**
_____	_____	_____	_____	In	_____	**Hemp fibers**
_____	_____	_____	±	In	_____	**sulfonated melamine-formaldehyde**
In	In	De	_____	In	_____	**bottom ash**
_____	_____	_____	_____	In	_____	**Magnesium oxide**

_____	De	_____	_____	In	_____	**Aluminum silicate**
_____	De	_____	±	In	±	**Nano carboxylate ether**
_____	De	_____	_____	In	_____	**Aluminum stearate**
	In	De	_____	In	_____	**Fly ash**
_____	De	_____	_____	In	-	**Carbon nanotubes**
_____	_____	_____	_____	In	_____	**Pro-pylon fibers**
_____	In	De	_____	In	_____	**Tobacco waste**
In	_____	De	_____	De	_____	**Citric acid**
In	De	De	_____	In	_____	**Pozzallan &Furnace slag**
_____	_____	_____	_____	In	_____	**Types of cement**
In	_____	De	_____	In	_____	**rice husk**
Somewhat positive / ± :positive / + :negative. / -: incremental:In. / decrease:De /PDe. In the high percentage of decrease. PDe						**Table guide**

Conclusions

Gypsum mortar is among the earliest materials used in the structure and ornamentations of historical buildings, and still remains a most widely used material in contemporary architecture. Understanding the properties of plaster in terms of structure and changes in its functional properties can be placed under the most important specializations in the field of cultural heritage studies. Our results suggest that the shape, crystal, and structure of gypsum crystals have a direct bearing on the properties of mortars. Conditions of the mineral deposit, additives and processing methods are also central to gypsum's structure. For example, some additives will reduce the size of hexagonal gypsum crystals. As regards mine's conditions, phenomena such as crystal growth, twinning and the initial size of gypsum crystals are affected by such factors as temperature, directions of pressure on the crystal, pH, and impurities existing in the mine.

References

[1] Ossorio M, Van Driessche AE, Pérez P, García-Ruiz JM. The gypsum–anhydrite paradox revisited. Chemical Geology. 2014 Oct 29;386:16-21. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.07.026

[2] Liu K, Han S, Gao W, Tang YN, Han X, Liu Z, Bao L, Zhi M, Wang H, Wang Y, Du H. Changes of Mineralogical Properties and Biological Activities of Gypsum and Its Calcined Products with Different Phase Structures. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine. 2021 Mar 10;2021. https://doi.org/10.1155/2021/6676797.

[3] Hami, A. Building Materials. Twenty-fifth edition. University of Tehran. Tehran.2020.[in Persian]

[4] Artioli G, Secco M, Addis A. The Vitruvian legacy: Mortars and binders before and after the Roman world. https://doi.org/10.1180/EMU-notes.20.4.

[5] Montana, G., & Ronca, F. (2002). The "recipe" of the stucco sculptures of Giacomo Serpotta. *Journal of Cultural Heritage*, *3*(2), 133-144. https://doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01169-X

[6] Franzini M, Leoni L, Lezzerini M. A procedure for determining the chemical composition of binder and aggregate in ancient mortars: its application to mortars from some medieval buildings in Pisa. Journal of Cultural Heritage. 2000 Dec 1;1(4):365-73. https://doi.org/10.1016/S1296-2074(00)01092-X.

[7] Dadvar;A.,mohseni,Z & Mir Fattah,A.. Limestone art in Vakil bath in Shiraz. Islamic Iranian city, Issue 20.2014.[in Persian].

[8] Yang F, Zhang B, Ma Q. Study of sticky rice− lime mortar technology for the restoration of historical masonry construction. Accounts of chemical research. 2010 Jun 15;43(6):936-44. https://doi.org/10.1021/ar9001944.
[9] Zhu C, Xu X, Liu W, Xiong F, Lin Y, Cao C, Liu X. Softening damage analysis of gypsum rock with water immersion time based on laboratory experiment. IEEE Access. 2019 Sep 2;7:125575-85. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2939013
[10] Hass M, Sutherland GB. The infra-red spectrum and crystal structure of gypsum. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1956 Sep 11;236(1207):427-45. https://doi.org/10.1098/rspa.1956.0146
[11] Zha F, Qiao B, Kang B, Xu L, Chu C, Yang C. Engineering properties of expansive soil stabilized by physically amended titanium gypsum. Construction and Building Materials. 2021 Oct 11;303:124456. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124456.
[12] Lager GA, Armbruster T, Rotella FJ, Jorgensen JD, Hinks DG. A crystallographic study of the low-temperature dehydration products of gypsum, CaSO4· 2H2O: hemihydrate, CaSO4· 0.50 H2O, and γ-CaSO 4. American Mineralogist. 1984 Oct 1;69(9-10):910-9.
[13] Comodi P, Nazzareni S, Zanazzi PF, Speziale S. High-pressure behavior of gypsum: A single-crystal X-ray study. American Mineralogist. 2008 Oct 1;93(10):1530-7. https://doi.org/10.2138/am.2008.2917
[14] Oliveira ML, Flores EM, Dotto GL, Neckel A, Silva LF. Nanomineralogy of mortars and ceramics from the Forum of Caesar and Nerva (Rome, Italy): The protagonist of black crusts produced on historic buildings. Journal of Cleaner Production. 2021 Jan 1;278:123982. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123982.
[15] Behzadi Moghadam, N & Hassanzadeh Gucci, J. Gypsum Engineering: Applied Handbook for Students and Quality Managers. Tehran: Sanabad.2015.[in Persian].
[16] Rubbo M, Massaro FR, Aquilano D, Vanzetti W. Morphology of gypsum: a case study. Crystal Research and Technology. 2011 Aug;46(8):779-83. https://doi.org/10.1002/crat.201000601
[17] MISHMASTNEHI M. The Application of Crystallographic Interpretation on Technical Study of Gypsum-Based Historical Materials (Case studies of stucco decoration of Kuh-e Khwaja and Gypsum Mortars from Shadiakh and Alamut). JOURNAL OF RESEARCH ON ARCHAEOMETRY.1(2).1-14.2015. 20.1001.1.24764647.1394.1.2.5.6
[18] Aquilano D, Otálora F, Pastero L, García-Ruiz JM. Three study cases of growth morphology in minerals: Halite, calcite and gypsum. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. 2016 Jun 1;62(2):227-51. https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2016.04.012
[19] Aquilano D, Otálora F, Pastero L, García-Ruiz JM. Three study cases of growth morphology in minerals: Halite, calcite and gypsum. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. 2016 Jun 1;62(2):227-51. https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2016.04.012
[20] Hargis CW, Kirchheim AP, Monteiro PJ, Gartner EM. Early age hydration of calcium sulfoaluminate (synthetic ye'elimite, C4A3S) in the presence of gypsum and varying amounts of calcium hydroxide. Cement and Concrete Research. 2013 Jun 1;48:105-15. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.03.001
[21] Pinto AJ, Jimenez A, Prieto M. Interaction of phosphate-bearing solutions with gypsum: Epitaxy and induced twinning of brushite (CaHPO4· 2H2O) on the gypsum cleavage surface. American Mineralogist. 2009 Feb 1;94(2-3):313-22. https://doi.org/10.2138/am.2009.3046
[22] Vogel MB, Des Marais DJ, Parenteau MN, Jahnke LL, Turk KA, Kubo MD. Biological influences on modern sulfates: Textures and composition of gypsum deposits from Guerrero Negro, Baja California Sur, Mexico. Sedimentary Geology. 2010 Jan 15;223(3-4):265-80. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2009.11.013
[23] Al-Youssef M. Gypsum Crystals Formation and Habits, Umm Said Sabkha, Qatar. InSabkha ecosystems 2014 (pp. 23-54). Springer, Dordrecht. DOI: 10.1007/978-94-007-7411-7_2
[24] Rubbo M, Bruno M, Massaro FR, Aquilano D. The five twin laws of gypsum (CaSO4· 2H2O): a theoretical comparison of the interfaces of the contact twins. Crystal growth & design. 2012 Jan 1;12(1):264-70. https://doi.org/10.1021/cg201031s
[25] Brunton PA, Davies RP, Burke JL, Smith A, Aggeli A, Brookes SJ, Kirkham J. Treatment of early caries lesions using biomimetic self-assembling peptides–a clinical safety trial. British dental journal. 2013 Aug;215(4):E6-. https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2013.741

[26] Van Jaarsveld F. *Characterising and mapping of wind transported sediment associated with opencast gypsum mining* (Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University
[27] Sadeghiamirshahidi M, Vitton SJ. Laboratory study of gypsum dissolution rates for an abandoned underground mine. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019 Jul;52(7):2053-66. https://doi.org/10.1007/s00603-018-1696-6
[28] Bel-Anzué P, Elert K. Changes in traditional building materials: the case of gypsum in Northern Spain. Archaeological and Anthropological Sciences. 2021 Oct;13(10):1-7. https://doi.org/10.1007/s12520-021-01438-6.
[29] Oudbashi O, Shekofte A. Traditional methods of gypsum production in province of Khuzestan, southwest of Iran. InHMC08, Historical Mortars Conference Characterization, Diagnosis, Conservation, Repair and Compatibility 2008.
[30] Bel-Anzué P, Almagro A, Pérez MP, Rodriguez-Navarro C. Influence of the calcination process in traditional gypsum with structural behavior. Ge-conservación. 2017 Jun 30;11:79-85.
[31] Vegas F, Mileto CA, Fratini FA, Rescic SI. May a building stand upon gypsum structural walls and pillars? The use of masonry made of gypsum in traditional architecture in Spain. Proceeding of the Eight International Masonry. 2010:2183-92.
[32] Yilmaz I. Differences in the geotechnical properties of two types of gypsum: alabastrine and porphyritic. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2007 May;66(2):187-195. https://doi.org/10.1007/s10064-006-0055-0
[33] A Hatim NA, Al-Khayat IK, Abdulla MA. Modification of gypsum products (Part I): physical and mechanical properties of adding some additives on different types of gypsum products. Al-Rafidain Dental Journal. 2007 Jun 1;7(2):206-12.
[34] Badens E, Veesler S, Boistelle R. Crystallization of gypsum from hemihydrate in presence of additives. Journal of Crystal Growth. 1999 Mar 1;198:704-9. https://doi.org/10.1016/S0022-0248(98)01206-8
[35] Winnefeld F, Martin LH, Müller CJ, Lothenbach B. Using gypsum to control hydration kinetics of CSA cements. Construction and Building Materials. 2017 Nov 30;155:154-63. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.217
[36] Singh NB. The activation effect of K2SO4 on the hydration of gypsum anhydrite, CaSO4 (II). Journal of the american ceramic society. 2005 Jan;88(1):196-201. https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2004.00020.x
[37] Sievert T, Wolter A, Singh NB. Hydration of anhydrite of gypsum (CaSO4. II) in a ball mill. Cement and concrete research. 2005 Apr 1;35(4):623-30. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.010
[38] Golež M, Pogačnik Ž, Mladenović A. Laboratory-prepared lime-gypsum mixtures based on the know-how of traditional technology. Journal of Cultural Heritage. 2018 Jul 1;32:38-43. https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.02.011
[39] La Spina V. Study of traditional gypsum in Spain: Methodology and initial results. InBuilding Knowledge, Constructing Histories 2018 Jul 11 (pp. 829-836). CRC Press. 9780429446719
[40] Gliozzo E, Pizzo A, La Russa MF. Mortars, plasters and pigments—research questions and sampling criteria. Archaeological and Anthropological Sciences. 2021 Nov;13(11):1-30. https://doi.org/10.1007/s12520-021-01393-2
[41] Frederiksen R, Marchand E, editors. Plaster casts: making, collecting and displaying from classical antiquity to the present. Walter de Gruyter; 2010 Sep 27.
[42] Raghunathan T. Recent Research of Lime Mortar and FAL-G with Urea. Advanced Aspects of Engineering Research Vol. 14. 2021 May 20:98-103. Print ISBN: 978-93-91215-88-0, eBook ISBN: 978-93-91215-89-7
[43] Ashurst J, Ashurst N. Practical building conservation. Vol. 3: mortars, plasters and renders. 1988.
[44] Singh M, Vinodh Kumar S. Mineralogical, chemical, and thermal characterizations of historic lime plasters of thirteenth–sixteenth-century Daulatabad Fort, India. Studies in Conservation. 2018 Nov 17;63(8):482-96. https://doi.org/10.1080/00393630.2018.1457765
[45] Ponce-Antón G, Zuluaga MC, Ortega LA, Agirre Mauleon J. Petrographic and Chemical–Mineralogical Characterization of Mortars from the Cistern at Amaiur Castle (Navarre, Spain). Minerals. 2020 Mar 31;10(4):311. https://doi.org/10.3390/min10040311.

[46] Cechova E. The effect of linseed oil on the properties of lime-based restoration mortars.2009. DOI 10.6092/unibo/amsdottorato/2267.
[47] ORATTAN G, JONES JR, COMPTON W. VOLUME XVIL-NO. 48. HARRISONBURG, VA., THURSDAY, SEPTEMBER 14, 1882.
[48] Pintea AO, Manea DL. New types of mortars obtained by aditiving traditional mortars with natural polymers to increase physico-mechanical performances. Procedia Manufacturing. 2019 Jan 1;32:201-7. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.203
[49] Binici H, Resatoglu R, Aksogan O. Effect of egg white, perlite, gypsum and fly ash in environment friendly insulation materials. Facta Universitatis. Series: Architecture and Civil Engineering. 2019 Jan 24:329-42. ISSN 2406-0860 (Online)
[50] Philokyprou M. The earliest use of lime and gypsum mortars in Cyprus. InHistoric Mortars 2012 (pp. 25-35). Springer, Dordrecht. DOI: 10.1007/978-94-007-4635-0_3
[51] Brunello V, Bersani D, Rampazzi L, Sansonetti A, Tedeschi C. Gypsum based mixes for conservation purposes: Evaluation of microstructural and mechanical features. Materiales de Construcción. 2020 Mar 30;70(337):e207-. DOI: 10.3989/mc
[52] Monaco M, Aurilio M, Tafuro A, Guadagnuolo M. Sustainable mortars for application in the cultural heritage field. Materials. 2021 Jan 27;14(3):598. https://doi.org/10.3390/ma14030598
[53] Jroundi F, Gonzalez-Muñoz MT, Garcia-Bueno A, Rodriguez-Navarro C. Consolidation of archaeological gypsum plaster by bacterial biomineralization of calcium carbonate. Acta biomaterialia. 2014 Sep 1;10(9):3844-54. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2014.03.007
[54] Çolak A. Density and strength characteristics of foamed gypsum. Cement and Concrete Composites. 2000 Jun 1;22(3):193-200. https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00008-1
[55] Palomo A, Blanco-Varela MT, Martinez-Ramirez S, Puertas F, Fortes C. Historic mortars: characterization and durability. New tendencies for research. InAdvanced Research Centre for cultural heritage interdisciplinary projects, Fifth Framework Programme Workshop 2002 Feb 4.
[56] Wong LN, Jong MC. Water saturation effects on the Brazilian tensile strength of gypsum and assessment of cracking processes using high-speed video. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2014 Jul;47(4):1103-15. https://doi.org/10.1007/s00603-013-0436-1
[57] Vegas F, Mileto C, Ivorra S, Baeza F. Checking gypsum as structural material. InApplied Mechanics and Materials 2012 (Vol. 117, pp. 1576-1579). Trans Tech Publications Ltd. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.117-119.1576
[58] Sakthieswaran N, Sophia M. Effect of superplasticizers on the properties of latex modified gypsum plaster. Construction and Building Materials. 2018 Aug 10;179:675-91. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.150.
[59] Huang Y, Xu C, Li H, Jiang Z, Gong Z, Yang X, Chen Q. Utilization of the black tea powder as multifunctional admixture for the hemihydrate gypsum. Journal of Cleaner Production. 2019 Feb 10;210:231-7. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.304
[60] Lewry AJ.Williamson J. The setting of gypsum plaster. Journal of materials science. Dec;29(23):6085-6090.1984
[61] Rodríguez-Navarro C. Binders in historical buildings: Traditional lime in conservation. Semin. SEM. 2012 Jun;9:91-112. ISSN 1698-5478
[62] Moropoulou A, Bakolas A, Anagnostopoulou S. Composite materials in ancient structures. Cement and concrete composites. 2005 Feb 1;27(2):295-300. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.018
[63] Iucolano F, Liguori B, Aprea P, Caputo D. Evaluation of bio-degummed hemp fibers as reinforcement in gypsum plaster. Composites Part B: Engineering. 2018 Apr 1;138:149-56. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.037
[64] Tarannum N, Pooja KM, Khan R. Preparation and applications of hydrophobic multicomponent based redispersible polymer powder: A review. Construction and Building Materials. 2020 Jun 30;247:118579. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118579.
[65] Ustinova YV. Influence of the polymeric additives on the process of calcium sulfatedihydrate crystallization. InE3S Web of Conferences 2020 (Vol. 220, p. 01035). EDP Sciences.
[66] Janus M, Zatorska J, Zając K, Kusiak-Nejman E, Czyżewski A, Morawski AW. The mechanical and photocatalytic properties of modified gypsum materials. Materials Science and Engineering: B. 2018 Oct 1;236:1-9. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2018.11.015.

[67] Pundir A, Garg M, Singh R. Evaluation of properties of gypsum plaster-superplasticizer blends of improved performance. Journal of Building Engineering. 2015 Dec 1;4:223-30. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.09.012.
[68] Khalil AA, Tawfik A, Hegazy AA, El-Shahat MF. Effect of some waste additives on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites. Construction and building materials. 2014 Oct 15;68:580-6. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.081.
[69] Abbood AA, Atshan AF, AL-Ridha AS. Improvement of Local Gypsum Plaster Setting Time by the Combined Usage of (TGP) and (PVA) Additives. InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020 Jun 1 (Vol. 870, No. 1, p. 012106). IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/870/1/012106
[70] Benjeddou O, Soussi C, Benali M, Alyousef R. Experimental Investigation of a New Ecological Block Made by Mixing Gypsum Plaster and Desert Sand. Arabian Journal for Science and Engineering. 2020 May;45(5):4037-52. https://doi.org/10.1007/s13369-020-04362-4.
[71] Chindaprasirt P, Boonserm K, Chairuangsri T, Vichit-Vadakan W, Eaimsin T, Sato T, Pimraksa K. Plaster materials from waste calcium sulfate containing chemicals, organic fibers and inorganic additives. Construction and Building Materials. 2011 Aug 1;25(8):3193-203. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.004.
[72] Hashempour M, A Samani A, Heidari A. Essential Improvements in Gypsum Mortar Characteristics. International Journal of Engineering. 2021 Feb 1;34(2):319-25. 10.5829/IJE.2021.34.02B.03
[73] Ma L, Xie Q, Evelina A, Long W, Ma C, Zhou F, Cha R. The effect of different additives on the hydration and gelation properties of composite dental gypsum. Gels. 2021 Aug 11;7(3):117. https://doi.org/10.3390/gels7030117
[74] 100Buryanov AF. Water-resistant gypsum compositions with man-made modifiers. Procedia Engineering. 2017 Jan 1;172:867-74. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.087.
[75] Romero-Gómez MI, Pedreño-Rojas MA, Pérez-Galvez F, Rubio-de-Hita P. Characterization of gypsum composites with polypropylene fibers from non-degradable wet wipes. Journal of Building Engineering. 2021 Feb 1;34:101874. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101874
[76] Camarini G, Pinto MC, de Moura AG, Manzo NR. Effect of citric acid on properties of recycled gypsum plaster to building components. Construction and Building Materials. 2016 Oct 15;124:383-90. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.112.
[77] Magallanes-Rivera RX, Juarez-Alvarado CA, Valdez P, Mendoza-Rangel JM. Modified gypsum compounds: An ecological–economical choice to improve traditional plasters. Construction and building materials. 2012 Dec 1;37:591-6. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.054.
[78] Chernyshova N, Lesovik V, Fediuk R, Timokhin R. Enhancement of fresh properties and performances of the eco-friendly gypsum-cement composite (EGCC). Construction and Building Materials. 2020 Nov 10;260:120462. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120462
[79] Cascione V, Maskell D, Shea A, Walker P, Mani M. Comparison of moisture buffering properties of plasters in full scale simulations and laboratory testing. Construction and Building Materials. 2020 Aug 20;252:119033. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119033
[80] Santos T, Gomes MI, Silva AS, Ferraz E, Faria P. Comparison of mineralogical, mechanical and hygroscopic characteristic of earthen, gypsum and cement-based plasters. Construction and Building Materials. 2020 Sep 10;254:119222. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119222
[81] Sai AN, Ramadoss R. A review on role of additives & pozzolanic materials in ancient structures. Materials Today: Proceedings. 2021 Jan 1;43:1383-8. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.173
[82] 108. Khalil AA, Tawfik A, Hegazy AA, El-Shahat MF. Effect of different forms of silica on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites. Materiales de construcción. 2013 Dec 30;63(312):529-37.
[83] D'Armada P, Hirst E. Nano-lime for consolidation of plaster and stone. Journal of architectural conservation. 2012 Jan 1;18(1):63-80. https://doi.org/10.1080/13556207.2012.10785104.
[84] Jean Chardin. Chardin's Travel Letter. Translated by Iqbal Yaghmaei. second edition.Tos.Tehran.2014 [In Persian].

پژوهه باستان‌سنجی ۱۴۰۱؛ ۸(۱): ۱۸۵-۲۰۶

پژوهه باستان‌سنجی

DOI: 10.52547/jra.8.1.185

URL: http://jra-tabriziau.ir/

مقاله مروری

مروری بر ساختار، کاربرد، فرایند تولید و تأثیر افزودنی‌ها در ملاط سنتی گچ

حامد یعقوب‌زاده[۱]، مهدی رازانی[*]

۱. کارشناسی ارشد، مرمت اشیای فرهنگی و تاریخی، دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

۲. دانشیار، دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۳۰ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۵**

چکیده

ملاط‌ها بخش جدایی‌ناپذیر در ساخت بناهای تاریخی و حتی امروزی هستند و در بخش‌های مختلف بنا کاربرد دارند. بنابراین، برای ایجاد بنای باکیفیت و پایداری خوب در طول زمان می‌بایست در بهبود و ارتقای کیفیت ملاط‌ها و مصالح تلاش‌هایی انجام داد. ملاط گچ نوعی مادهٔ معدنی است و ساختاری بلوری و شبکهٔ هگزاگونالی دارد و در حالت کلی مهم‌ترین عوامل در تغییر خواص ملاط‌های گچی به سه حالت نوع معدن، نحوهٔ پخت و افزودنی‌ها وابسته است. به‌همین منظور، هدف از انجام این پژوهش مروری بر نحوهٔ تأثیر عوامل گفته‌شده بر خواص ملاط‌ها خواهد بود که در راستای این هدف مطالعات کتابخانه‌ای تنها روش پژوهش خواهد بود. با توجه گستردگی معادن گچ در محیط‌های متنوع اولین عامل تأثیرگذار در خواص گچ نوع معدن و محیط معدن است، به‌طوری‌که در معادن مختلف، ژیپس دارای ناخالصی و شرایط رشد بلوری متفاوتی بوده که این امر به تولید ملاط گچی خاص در معادن مختلف منجر می‌شود. نحوهٔ پخت و افزودنی‌ها که از عوامل دیگر تأثیرگذار در ملاط گچی است؛ هرکدام به‌نحوی در ساختار ملاط‌ها تأثیرگذار خواهند بود، به‌طوری‌که توجه به هرکدام از موارد گفته‌شده باعث تغییرات در شکل بلوری و فضای میان‌بلوری شده و این تغیرات ایجادشده به تفاوت خواص در ملاط‌های گچی منجر می‌شود. پس، روش‌های متنوع آماده‌سازی گچ و همچنین برخی افزودنی‌های مؤثر در ملاط‌ها معرفی می‌شود.

واژگان کلیدی: بلور، ملاط، گچ، افزودنی، معدن، دما، بناهای تاریخی.

* نویسنده مسئول مکاتبات: تبریز، خیابان آزادی، میدان حکیم‌نظامی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، کدپستی: ۱۱۶۶۷۳۶۶۳۱

پست الکترونیکی: m.razani@tabriziau.ac.ir

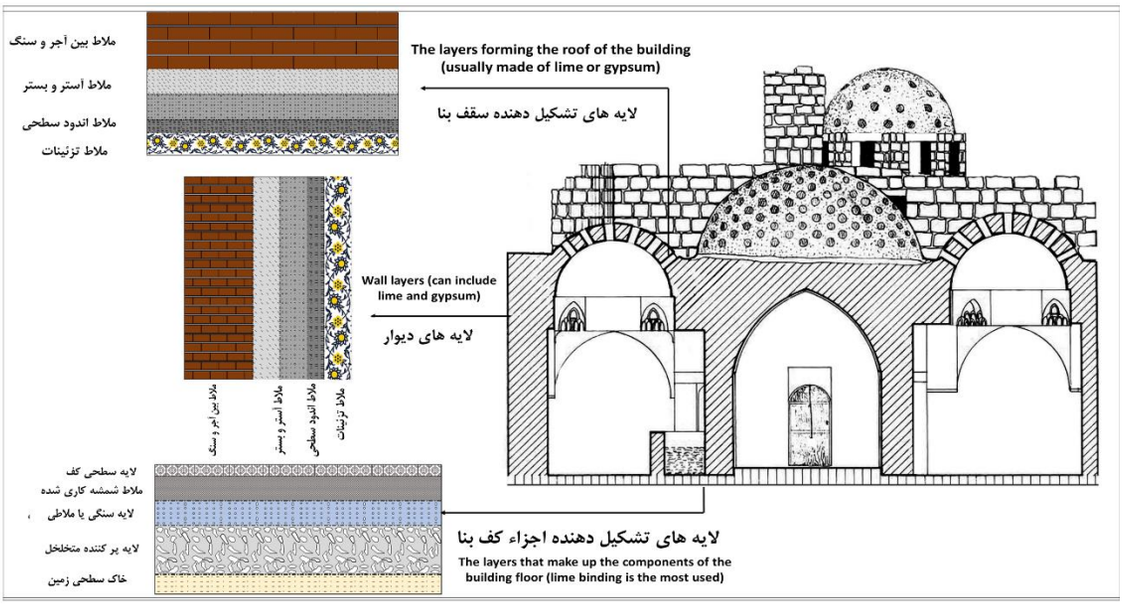
۱. مقدمه

ملاط در کتب گوناگون تعاریف مختلفی دارد، ولی در حالت کلی، ماده‌ای با خاصیت خمیری است که می‌تواند مصالح بنایی را به یکدیگر وصل [1] و یا خود به‌عنوان مصالح اصلی به‌مانند اندود و آژند کاربرد داشته باشد [3،2]. معابد شاهان عیلامی در دورانتاش چغازنبیل [4] از نمونهٔ بارز قدمت و تاریخچهٔ طولانی این ماده محسوب می‌شود. در ادبیات کهن نیز استفاده از گچ را بیشتر به‌عنوان ملاط و اندود آجر و سنگ و حتی مصالحی به‌عنوان تزئین معرفی می‌کنند؛ و در شعرهای مشاهیری همچون فردوسی، واژهٔ گچ به‌عنوان تزئین‌کننده استفاده شده است، به‌غیر از مشاهیر کهن ایرانی، افرادی مانند ارسطو نیز از واژهٔ ملاط استفاده کرده‌اند[5]. ملاط با بست گچ متداول‌ترین مادهٔ مرمتی در حفاظت از آرایه‌های معماری محسوب می‌شود. ازاین‌رو، مطالعهٔ ساختاری، عوامل تعین‌کننده در ایجاد خواص متفاوت ملاط‌های گچی و روش‌های بهبود گچ در جهت حفاظت مؤثر آثار و بناها الزامی است، چراکه این ماده علاوه‌بر صرفهٔ اقتصادی ویژگی‌های دیگری مانند شکل‌پذیری بالا، آسیب‌رسانی کم و برگشت‌پذیری خوب این ماده در هنگام استفاده در آثار تاریخی (مواد هم‌ردهٔ گچ به‌مانند سیمان برگشت‌پذیری کم و حتی آسیب‌رسان‌تر به آثار هستند) ازجمله ویژگی‌های مثبت این ماده محسوب می‌شود، ولی ناگفته نماند که این ماده دارای ضعف‌هایی نیز است. نمونهٔ بارز این ضعف‌ها مقاومت کم در مقابل رطوبت و مناسبت‌نبودن ویژگی‌های مقاومتی در برخی از موقعیت‌های استفاده از این ماده در بناهای تاریخی (برای مثال، مقاومت کم این ماده در استفاده به‌عنوان ملاط دوغابی در استحکام‌بخشی بناها) است. مهم‌ترین بخش در تشکیل یک ملاط، چسب و به بیانی دیگر بست آن است. علاوه‌بر بست، موادی مانند سنگ‌دانه‌ها، خاک‌ها و حتی مواد آلی نیز در ساخت یک ملاط کاربرد دارد. مصالحی وجود ندارد که تمامی خواسته را برآورده کند [6]. با نگاهی به این گفته چنین به‌نظر می‌رسد مواد هموار دارای ضعف‌هایی خواهند بود، ولی می‌توان با یک‌سری مداخلات عمدی برخی از خواص مواد به‌مانند ملاط را بهبود داد. عمده عامل این تغییر خواص در ملاط‌ها مربوط به ساختار خواهد بود و خود ساختار نیز با عوامل مختلفی مانند شرایط معدن ماده، افزودنی‌ها و فرایند تهیهٔ ملاط‌ها قابل اصلاح است. برای نمونه دمای پخت در بست می‌تواند تغییراتی در کیفیت ملاط ایجاد کند، به‌طوری‌که در گچ با افزایش دما، ژیپس آب بلوره‌ای خود را از دست می‌دهد و به انواع مختلف انیدریت تبدیل می‌شود [8،7]. نمونهٔ دیگر از روش بهبود افزودنی‌هاست، به‌طوری‌که از گذشته‌های دور استفاده از تخم‌مرغ در ملاط آهکی به‌عنوان افزودنی برای افزایش مقاومت مکانیکی متداول بود[9]. افزودنی‌ها و نحوهٔ پخت فقط بخشی از عوامل مؤثر در تعیین خواص ملاط‌ها به‌خصوص ملاط گچی بوده که می‌بایست عامل‌های دیگری همچون نوع معدن، ساختار بست ملاط‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. طبق گفته‌های اخیر، هدف از انجام این پژوهش بررسی عوامل تأثیرگذار بر خواص ملاط‌ها به‌خصوص ملاط گچ و بهبود ویژگی‌های مکانیکی آن است. ازاین‌رو، بررسی ساختار گچ، تأثیر افزودنی‌ها بر ملاط‌ها و بررسی معدن و نحوهٔ پخت ملاط‌های گچ به روش کتابخانه‌ای دارای اهمیت است.

۲. تاریخچه و کاربرد ملاط‌ها

به‌کارگیری آتش و فناوری‌های مرتبط با آن در میان انسان‌ها را می‌توان منشأ ظهور و تولید گچ به‌حساب آورد. قابل‌توجه است که برخی مورخان اولین استفاده از ملاط گچ‌آهکی را در منطقهٔ گوبکلی تپهٔ ترکیه و مناطق خاورمیانه در هزارهٔ هفتم و هشتم ق.م می‌دانند [10]؛ این گستردگی زمانی استفادهٔ ملاط گچ و یا دیگر ملاط‌های سنتی هم‌رده باعث کاربردهای مختلفی برای ملاط‌ها می‌شود؛ ملاط بین آجر، لایهٔ بستر و آستر برای نقاشی‌ها و تزئینات، لایه‌اندود سطحی و حتی مجسمه‌ملاطی ازجمله کاربردهایی است که از این ماده در طول تاریخ بسیار مشاهده می‌شود [12،11]؛ شکل ۱ انواع کاربرد ملاط‌های مختلف را در بخش‌های متفاوت نشان می‌دهد. با توجه به کاربرد موردی ملاط‌ها به‌تبع ویژگی و خاصیت هر ملاط را نیز می‌بایست مدنظر داشت. برای مثال

مناسب است که حمام وکیل شیراز ذکر شود [13] با توجه به کاربرد بنا استفاده از ملاط گچی مناسب نخواهد بود و مناسب‌ترین ملاط مورداستفاده این نوع بناها که همواره در آن‌ها رطوبت وجود دارد، نوع آهک هیدرولیک (بسته‌های آهکی به دو بخش هیدرولیک و آهک هوایی تقسیم می‌شود که هرکدام خاصیت‌های مختلفی دارند) است [14]. مثال دیگر حضور برخی مواد معدنی به‌صورت افزودنی در ملاط است که ویژگی‌های خاصی برای ملاط‌ها می‌سازد. برای مثال شاردن اشارهٔ کوتاهی به استفاده از میکا در ملاط گچی برای درخشان‌ترکردن سطح ملاط تزئینات و اندود سطحی می‌کند [10]؛ از همین رو، معماران نوع ملاط خود را نسبت‌به کاربرد بنا انتخاب می‌کردند. بیشتر اوقات، هنرمند برای بهینه‌کردن ملاط دست به خلاقیت زده و از موادی که مرسوم به افزودنی‌های آلی هستند، در ملاط به کار می‌بردند. برای مثال حضور کازئین در ملاط آهکی باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود و حتی از این افزودنی در بناهای تاریخی نیز استفاده شده است [15].



شکل ۱: متداول‌ترین کاربرد ملاط‌ها در بناهای تاریخی

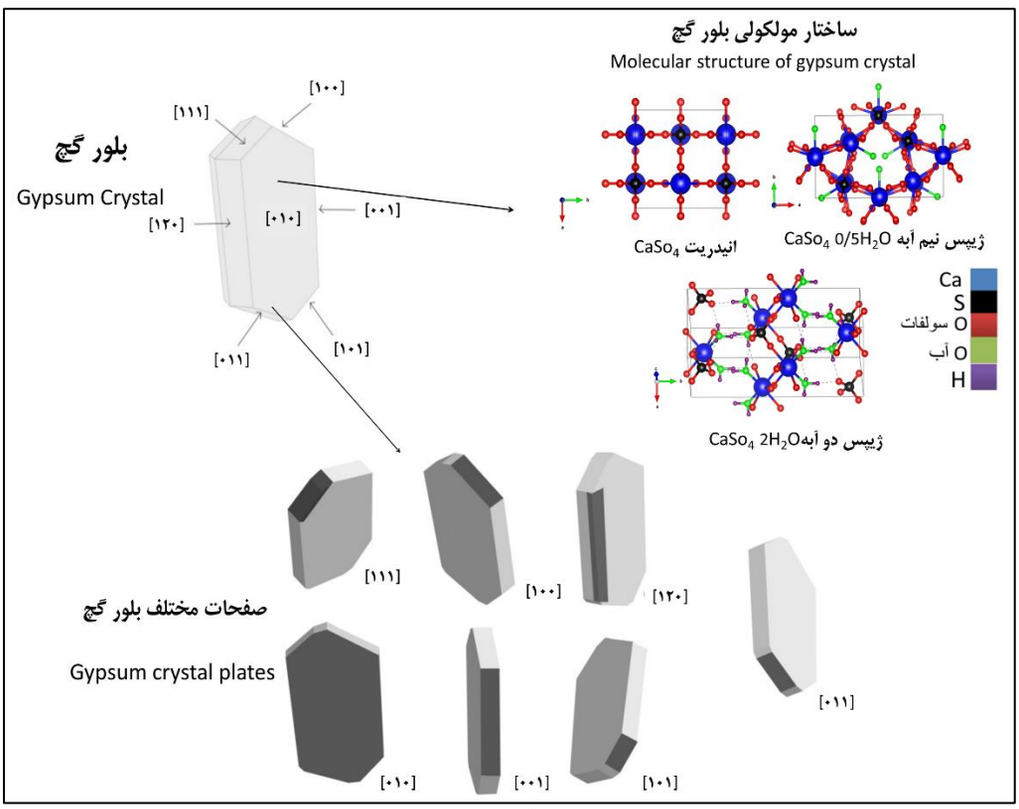
Fig. 1: The most common application of mortars in historical buildings

با توجه به گستردگی کاربرد، قدمت طولانی و تأثیر عواملی مانند افزودنی و دمای پخت در ملاط‌ها قطعاً نیازمند دانشی از سوی هنرمندان و پیشه‌وران در هر دورهٔ تاریخی بوده، به همین جهت برای درک بیشتر این مادهٔ کهن در راستای بهینه‌سازی ملاط با ویژگی‌های موردنظر مناسب است بحث ساختار گچ مورد ارزیابی قرار گیرد تا از چگونگی تأثیر این افزودنی‌ها بر ملاط‌ها شناخت مناسبی حاصل آید.

۳. ساختارشناسی گچ

شناخت ساختار مواد معدنی وابسته به دو عامل خواهد بود: الف: توجه به عناصر سازنده و نحوهٔ قرارگیری عناصر، یون‌ها و مولکول‌ها در داخل بلورها. ب: توجه به ریخت‌شناسی بیرونی بلورها؛ این دو عامل در ساختارشناسی مواد معدنی مکمل و وابسته یکدیگرند که هرگونه تغییراتی در هر مورد گفته‌شده تفاوت در هر دو بخش درون و بیرون بلور را باعث خواهد شد که این تغییرات در تعیین خواص نهایی ماده حائز اهمیت است. گچ دارای ساختار بلوری و منظم شبکه‌ای است که نحوهٔ قرارگیری بلورها در ساختار گچ از چندین قاعده مانند

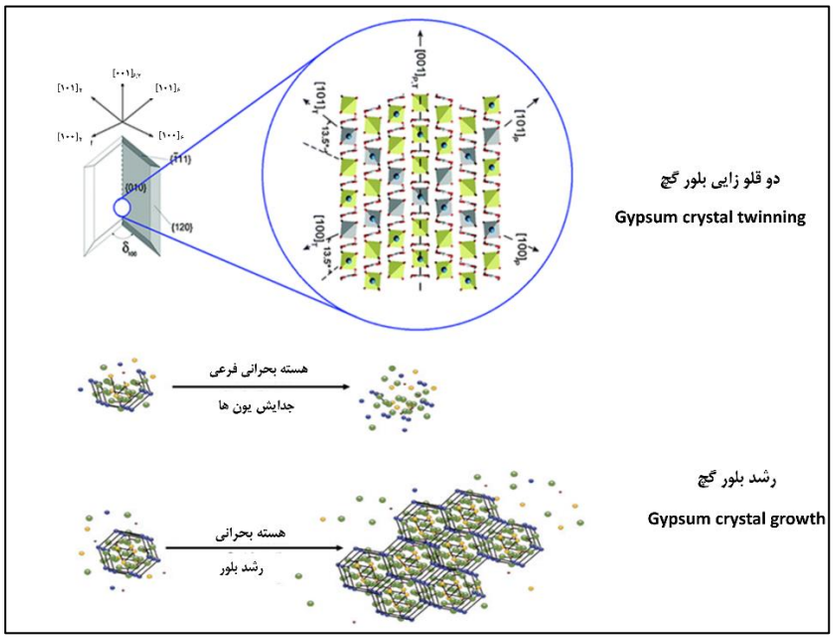
میزان و درصد حضور عناصر و موادی مانند اکسیژن در ساختار گچ نسبت‌به طبیعت پیروی می‌کند [16–18]. گوگرد احاطه‌شده به‌وسیلهٔ چهار اتم اکسیژن سولفات (So_4^{-2}) سازنده اصلی بلورهای ژیپس ($CaSo_4\ 2H_2O$) هستند و مولکول‌های آب در حوالی مرکز تقارن بلور قرار می‌گیرند و یون کلسیم(Ca) در اطراف اکسیژن‌های سولفات و دو مولکول‌های آب احاطه می‌شود، ولی این گفته‌ها به میزان آب موجود در گچ وابسته است و متناسب با آن تغییر می‌کند به‌طوری‌که با کم‌شدن مولکول‌های آب در بلور گچ که شبکه‌ای از نوع hcp دارند، اندازهٔ بلورها کوچک‌تر شده و نحوهٔ قرارگیری اتم‌ها نیز با تغییر همراه است[19,20] جایگاه هریک از عناصر گفته‌شده در تغییرات ساختار ژیپس به‌شدت تحت تأثیر عواملی مانند نوع و شرایط معدن، نحوهٔ پخت، ناخالصی‌های موجود است. فلذا، اگر ماده‌ای به‌عمد یا به‌صورت سهوی وارد ساختار گچ شود، بی‌نظمی‌هایی در نحوهٔ قرارگیری عناصر در بلور ایجاد می‌کند و باعث تغییرات شکلی بلور و تغییر خواص آن می‌شود. آبگیری یا ازدست‌دادن آب در بلورها از دیگر عامل مهم در تعیین ساختار گچ و کیفیت بلورهاست به‌گونه‌ای که تغییرات ناشی از عوامل مذکور در ساختار ملاطی مانند گچ باعث آسیب جدی در بلورها می‌شود، برای آسیب‌شناسی چنین عملکردی در ملاط‌های تاریخی می‌توان از تصاویر میکروسکوپ الکترونی استفاده کرد [21]. شکل ۲ محل قرارگیری عناصر موجود در بلور گچ را نشان می‌دهد. از طرفی، در حالت کلی ریخت‌شناسی بلورهای گچ به‌صورت شش‌وجهی (شکل ۱) و با اندازه‌های منظم است، ولی در طبیعت به‌ندرت بلور گچی به‌صورت ایده‌آل یافت می‌شود. ژیپس یا گچ در طبیعت به‌صورت دوآبه است یا به‌عبارتی‌دیگر حالت تعادل گچ در طبیعت با فرمول شیمیایی $CaSo4.2H_2O$ هم‌خوانی دارد. البته فازهای مختلفی از گچ به‌مانند گچ نیم‌آبه یا بدون آب نیز در اعماق معادن گچ یافت می‌شود [22,23].



شکل ۲: ساختار مولکولی گچ دوآبه، نیم‌آبه و انیدریت (بدون آب) ساخته‌شده توسط نرم‌افزار VESTA(ایده گرفته از منبع [24].)

Fig. 2: Molecular structure of two-hydrated, semi-hydrated and anhydrite (no water) gypsum made by VESTA software (idea taken from source [24].)

پدیدهٔ رشد بلور از مهم‌ترین مسائلی است که در ریخت‌شناسی بلورها موردبحث قرار می‌گیرد: رشد بلور به معنای جذب اتم، یون و مولکول‌هایی است که در اطراف یک مولکول به‌منظور ایجاد تعادل انرژی درون ساختار ایجاد می‌شود. به عبارتی، بلورهای گچ برای تعادل انرژی شروع به جذب اتم، یون و مولکول‌های اطراف خود می‌کند؛ زمانی رشد بلور فعال می‌شود که هستهٔ حداقل انرژی سطحی را برای جذب مواد اطراف خود را داشته و با جذب بیشتر مواد در جامد بلوره‌ای این انرژی سطحی به تعادل برسد؛ عملکرد کلی رشد بلور بدین گونه است که در هنگام حداقل‌کردن انرژی سطحی دال‌های بلوره‌ای اتم یا گروه‌های اتمی از پیکربندی اولیه به سمت پیکربندی بهینه منتقل می‌شوند و با تغییر مکان ذرات انرژی سطحی رفته‌رفته کاهش‌یافته و درنهایت به تعادل می‌رسد [25,23]. انجام این عملکرد بازه زمانی طولانی دارد. حتی ممکن است که رشد بلور پس از ساخت ملاط گچی و با کاربری‌های مختلف نیز ادامه داشته باشد [26]. ازاین‌رو، یکی از پژوهش‌هایی که امروزه صورت می‌گیرد، شناخت تاریخچه و سیر تکاملی رشد بلور است که این امر می‌تواند در حوزهٔ باستان‌سنجی ملاط‌هایی مانند گچ در آثار تاریخی کاربرد داشته و راهگشایی بسیاری از داده‌های مبهم در این حوزه باشد. عوامل دیگری که در رشد بلور مؤثر است، شامل محدودیت استوکیومتری، خنثی‌بودن الکتریسیته، فشار [20,27]، دما، اشباع‌شدگی، pH و دینامیک سیالی مواد در معادن است که هرکدام وابسته به شرایط مختلف می‌توانند موجب تغییراتی در اندازه و شکل بلور گردند؛ برای نمونه اگر فشار وارده در معدن بر بلورها همه‌جانبه نباشد، رشد بلور به‌طور یکسان در همهٔ جهات نخواهد بود [29،28]. دومین عامل در بررسی ساختار بلورها مفهوم دوقلوزایی؛ به معنای اشتراک برخی ویژگی‌ها در دوبلورهٔ مجاور هم به‌صورت تقارنی است. به‌عبارتی دیگر، وقتی عناصر مواد تشکیل‌دهندهٔ بلورهای مجاور یا صفحات مجاور یکدیگر شروع به اشتراک‌بخشی از ساختار خود می‌کنند، یک کپی از بلور در یک یا چند صفحهٔ مختلف بلورها می‌تواند ایجاد شود [28,30]. به‌نوعی دوقلوزایی باعث تغییراتی در داخل و بیرون بلور می‌شود. شکل ۳ از مجموعه تصاویر مربوط به رشد و دوقلوزایی گچ را نشان می‌کند.

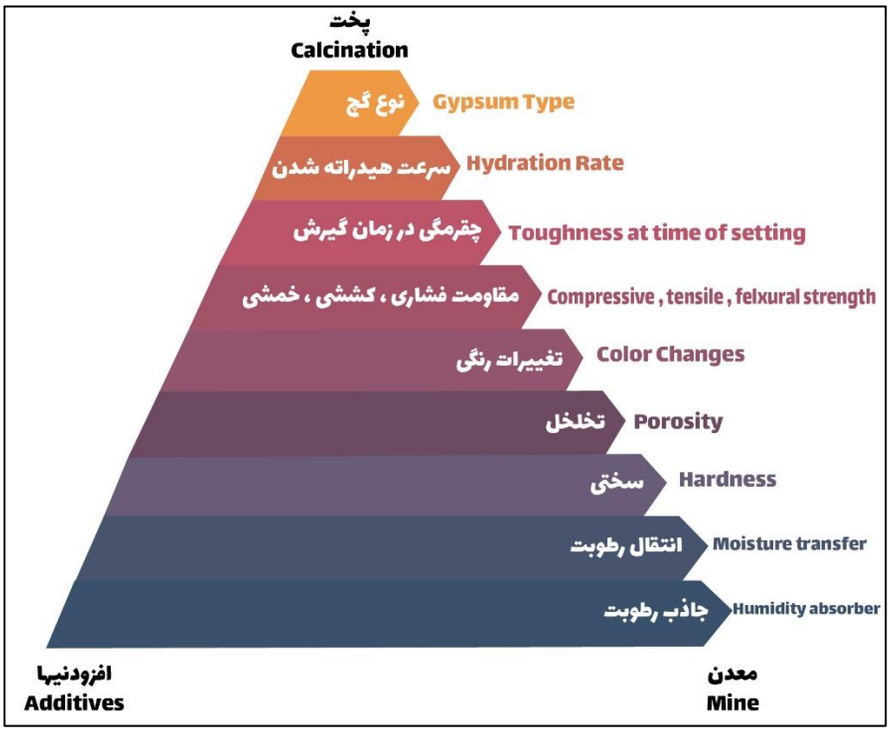


شکل ۳: تصویری از دوقلوزایی و رشد گچ را بیان می‌کند. تصویر بالا به‌اشتراک‌گذاشتن عناصر در صفحات مجاور هم یک بلور را بیان می‌کند [31] و تصویر پایین مراحل رشد بلور را نشان می‌دهد [32].

Fig. 3: It shows a form of twinning and growth of gypsum. The top picture shows the sharing of elements in adjacent planes of a crystal [31] and the bottom picture shows the stages of crystal growth[31]

آنچه در مطالب گذشته برمی‌آید، ارتباط مستقیم معدن در تعیین شکل ظاهری بلورهاست. ازاین‌رو، بررسی کلی این بخش نیز دور از موضوع اصلی پژوهش نخواهد بود. معادن مختلفی از منظر شرایط تشکیل وجود دارند. از این‌رو، گچ یا دیگر مواد رسوبی نسبت‌به معادن مختلف ویژگی و شکل مختلفی را از خود نشان می‌دهد [33] که این امر در منشأیابی ملاط‌ها حائز اهمیت خواهد بود. گچ را می‌توان در رسوب دریاها، دریاچه‌ها، رودخانه‌های دارای املاحی مانند نمک‌ها و فلزات یافت[34.35]. به‌هرحال، تاکنون بیشتر از هفتاد نوع کانی رسوبی شناخته‌شده که در حدود بیست‌وهفت نوع آن سولفاته هستند؛ به‌طورمعمول زمانی‌که آب دارای رسوبات سولفات، ۱۹درصد حجم خود را از دست دهد، ژیپس تشکیل می‌شود[22]. ژیپس در اعماق مختلف زمین دارای فازهای متفاوتی است. برای مثال، بیشتر اوقات ژیپس یافت‌شده لایه‌های ابتدایی و میانی در معادن گچ دارای آب میان بافتی بیشتری بوده با بیشترشدن عمق، میزان آب ساختار گچ کمتر می‌شود به‌طوری که در اعماق زیاد انیدریت نوع III بیشتر قابل یافت است؛ تفاوت ژیپس و انیدریت در میزان آب موجود در ساختار درونی خود است [36.37].

با توجه به مطالب گفته‌شده می‌توان نتیجه گرفت: الف: شناخت ساختار مواد بلوری که ملاط‌ها هم شامل این گفته است باعث هموارکردن مطالعات منشأیابی ملاط استفاده‌شده در بناها می‌شود. ب: شکل و ساختار درونی رابطه مستقیم باکیفیت گچ دارد. برای مثال، عامل pH باعث سست یا قوی‌شدن پیوند میان بلور و عناصر داخلی شده و در آخر، بر مقاومت نهایی و سختی اولیه گچ تأثیر خواهد داشت. علاوه‌بر ساختار میکروسکوپی ملاط‌ها که تأثیر مهمی بر ویژگی‌های آن دارد، عوامل دیگر مانند فرایند کلسینه و به‌طورکلی آماده‌سازی ملاط‌ها نیز بر کیفیت و ویژگی‌های ملاط تأثیر دارد؛ ازاین‌رو، فرایند تهیهٔ ملاط گچ نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت با توجه موضوع پژوهش بررسی فرایند تهیهٔ ملاط آهکی جزو اهداف اصلی نبوده. بر همین جهت این موضوع بررسی نخواهد شد، ولی برای مطالعات بیشتر منابع [38-40] معرفی می‌شود.

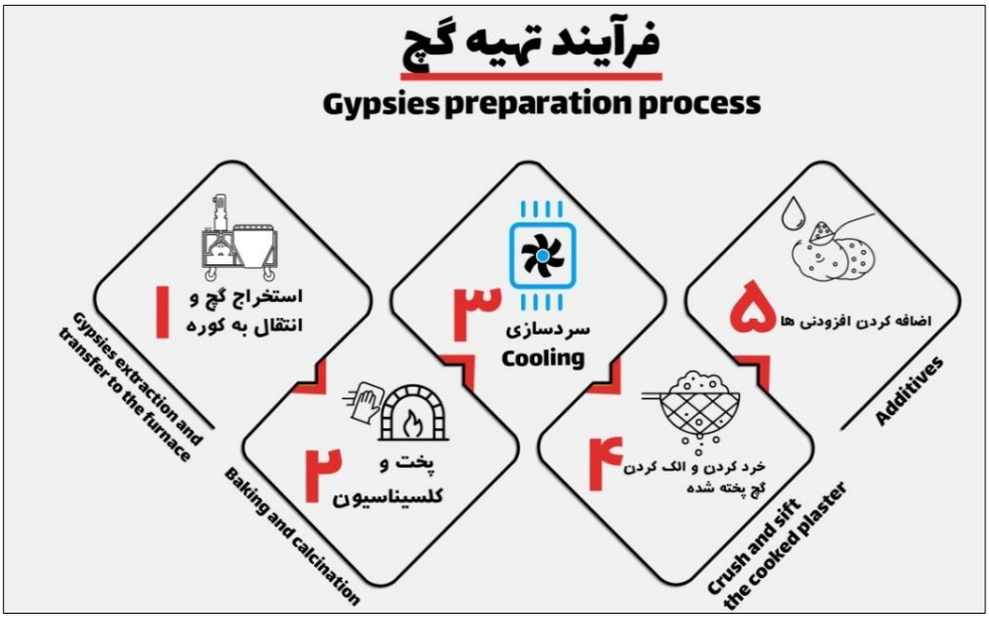


شکل ۴: ویژگی‌های ایجادشده در ملاط‌های تاریخی نسبت سه عامل معدن، پخت و افزودنی‌ها

Fig. 4: Characteristics created in historical mortars by the ratio of three mining factors, calcination and additives

٤-١ فرایند تهیه و تولید گچ

گچ خام زمانی در بناها کاربرد دارد که مراحلی را در جهت آماده‌سازی طی نماید. مراحل آماده‌سازی گچ برای استفاده در بناها و دیگر کاربردها از چندین مرحلهٔ کلی پیروی می‌کند. اولین مرحلهٔ فرایند تهیهٔ گچ، استخراج بلوک‌های گچ از معادن مطابق شکل ۵ است؛ در حالت کلی، معادن گچ به دو صورت روباز و بسته وجود دارند. در معادن روباز لایهٔ اولیه که در حدود یک تا دو متر به دلیل هوازدگی و تغییرات آب‌وهوایی شدید کاربرد چندانی ندارد. از همین رو، این لایه برداشته شده و لایهٔ دوم نیز به دلیل چگالی کم به‌عنوان پرکننده در گچ و آهک استفاده می‌شود، لایهٔ سوم و لایهٔ زیرین است که در پخت گچ استفاده می‌شود. دلیل چرایی این عمل به پُرچگال و فشرده‌بودن و حضور انواع ناخالصی‌های مؤثر تعیین خواص در این لایه بی‌ربط نیست. در هنگام استخراج بلوک‌های گچ از معادن احتمال زیادی می‌رود که بلوک‌های گچی دارای ناخالصی باشد، این ناخالصی یا افزودنی غیرعمدی تأثیرهای عمده‌ای بر ویژگی‌های گچ خواهد داشت؛ البته گفتن این مطلب مناسب است که این افزودنی‌های غیرعمدی بیشتر اوقات بر کیفیت گچ عملکرد مثبت دارد. برای مثال، حضور کوارتز و آهک به‌صورت اندک باعث بهبود کیفیت گچ از منظر پیوندهای بین‌بلوری خواهد شد و همچنین حضور این مواد در تاریخ‌گذاری ملاط‌ها به روش OSL نیز می‌تواند نقش داشته باشد[46-44].

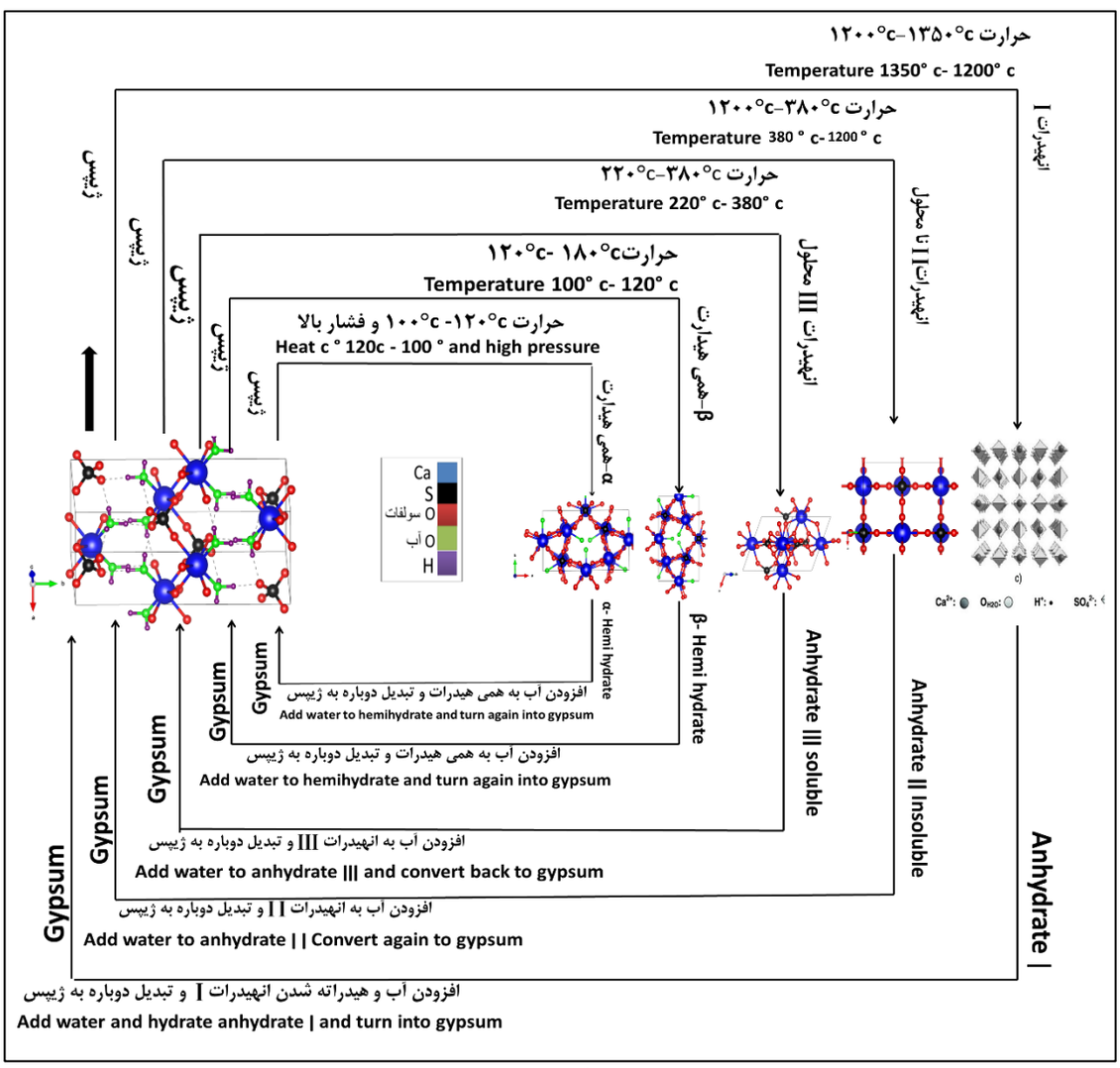


شکل ۵: فرایند تولید گچ ساختمانی به گونهٔ سنتی است که امروزه نحوهٔ تهیهٔ آن کمی متفاوت‌تر است (ایده گرفته از منبع [۴۶]).

Fig. 5: The process of producing building plaster in a traditional way (idea taken from source [46])

مرحلهٔ بعدی در فرایند تولید گچ کلسینه‌کردن در کوره‌هاست، کوره‌های ایران درگذشته به‌صورت تنوره‌ای یا تاوه‌ای بودند [9، 47]. جنس بدنهٔ اصلی کوره از بلوک‌های بزرگ گچی تشکیل می شوند و نحوهٔ چینش به‌گونه‌ای است که بلوک‌های بزرگ‌تر در بخش هایی که نزدیک به محل احتراق کوره هستند، قرار می‌گیرند؛ کلسینه‌کردن نیازمند حرارت و افزایش دمای بلوک‌های گچی است. بنابراین نیاز به تأمین سوخت برای شروع فرایند کلسینه شدن گچ وجود دارد. بیشتر نوع سوخت استفاده شده در کوره‌ها درختان، علوفه‌های خشک و زائد موجود در طبیعت بود، البته موادی همچون پوسته گردو و پسته نیز در جهت تأمین آتش موردنیاز کوره‌ها در برخی مناطق مرسوم بود[48,49]. بعد از قراردادن

بلوک‌های خردشدهٔ گچی درون کوره‌ها که از معادن استخراج شده بودند، مورد حرارت قرار می‌گیرد؛ زمان کلی برای این مرحله از فرایند در گذشته بین ۱۰ تا ۲۴ ساعت بود[46]. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، ژیپس در حرارت‌های مختلف انواع مختلفی از فازها را تشکیل خواهد داد. شکل ۶ راهنمای کامل در ایجاد فازهای گچ در دماهای مختلف است، به‌جز دما، عوامل فشار و رطوبت نسبی محیط کوره نیز باعث تولید گچی متفاوت می‌شود. برای مثال در فشار بالا (درگذشته برای افزایش فشار محیطی کوره بیشتر منافذ دیواره‌ها را پر می‌کردند) و دمای حدودی ۱۰۰ تا ۱۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد باعث تولید گچ همی هیدرات (نام دیگر همی هیدرات با سانیت نیز است $CASO_4.5\ H_2O$) از نوع آلفا می‌شود. درحالی‌که در فشار معمولی و در دمای ۱۲۰ تا ۱۴۰ درجهٔ سانتی‌گراد گچ همی‌هیدرات از نوع بتا تشکیل می‌شود. البته گفتنی است که اگر دمای حرارت در کوره‌ها بیشتر از ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد شود، ساختار گچ دچار زوال شده و دو فاز اکسید کلسیم و اکسید گوگرد ($Cao+So_2$). تشکیل خواهد شد [46,50,51].



شکل ۶: چرخهٔ تولید فازهای مختلف گچ و تبدیل دوبارهٔ آن‌ها به ژیپس ($CaSo_4\ 2H_2O$) (برگرفته از منابع [48-51])

Fig. 6: The production cycle of different gypsum phases and their transformation back into gypsum ($CaSo_4\ 2H_2O$) (taken from sources [48-51])

با توجه به شکل ۵، فرایند تولید فازهای مختلف گچ با دما رابطهٔ مستقیم دارد. همچنین ثابت‌شده است که هرچه میزان فاز کم‌آب‌تر باشد، برای تبدیل دوباره به گچ آبدار نیازمند زمان بیشتری است. نکتهٔ قابل‌درک این موضوع برای حفاظت‌گران آثار تاریخی نیز می‌تواند چنین بیان شود: الف: در بخش بازسازی تزئینات گچی، اگر گچی با فاز انیدریت انتخاب شود، زمان بیشتری برای گیرش و استفاده برای حفاظت‌گر می‌دهد. ب: امکان جذب افزودنی‌ها در فاز انیدریت به‌احتمال می‌تواند بیشتر از فاز همی‌هیدرات گچ باشد، البته بیشتر افزودنی‌ها رابطهٔ مستقیمی با سرعت هیدراته و گیرش ملاط گچ دارد که این نکته نیز باید در انتخاب نوع گچ و نوع افزودنی توسط مرمتگر مورد توجه گیرد [52–55]. پخت و کلسینه‌کردن بخشی از مرحلهٔ تولید گچ ساختمانی بوده و مرحلهٔ سردسازی، پودرکردن قطعات پخته‌شدهٔ گچ و افزودن آب و افزودنی‌ها دیگر مراحل آماده‌سازی ملاط گچ است. مرحلهٔ سردسازی وقت‌گیرتر از دیگر بخش و مراحل آماده‌سازی گچ است. به‌طوری‌که سردسازی گچ‌های کلسینه‌شده به یک تا دو شبانه‌روز زمان نیاز دارد؛ دلیل این آهسته بودن فرایند می‌تواند بر جلوگیری از واردشدن شوک حرارتی بر بلورهای گچ دانست. چرا این اتفاق احتمال ترک‌های بلوری را افزایش می‌دهد[56] که این عامل را نیز می‌توان در تصاویر میکروسکوپی مشاهده کرد.
بعد از سردسازی، خُرد و الک‌کردن گچ‌های کلسینه‌شده می‌بایست انجام گیرد تا ذراتی با اندازه‌های مختلف به‌دست آید. البته ناگفته نماند که اندازهٔ ذرات بر میزان کیفیت گچ تأثیر می‌گذارد. برای مثال توجه به ذرات ریز گچ (Alabastrine) و درشت‌دانه‌های گچ (Porphyritic) نیز در جهت تولید ملاط‌های با خواص مختلف مفید است و حتی نسبت‌به معادن روباز و زیرزمینی نیز گسترده اندازهٔ ذرات نیز باید متفاوت‌تر باشد [۴۶،۵۰،۵۸]. یکی دیگر از مراحل ساخت یک ملاط گچی استفاده از افزودنی‌های قبل از کاربرد به‌عنوان ملاط و اندود است. با توجه به منابع بررسی‌شده در جهت استفادهٔ افزودنی‌ها بر ملاط گچ در آثار تاریخی مشخص شد که بیشتر منابع افزودنی‌ها از نوع آلی بوده (به‌مانند حضور سریشم و کازئین در ملاط‌های تاریخی) ولی دیده می‌شود که افزودنی‌های معدنی نیز در ملاط باشد. البته در رابطه با افزودنی‌های معدنی این امکان وجود دارد که این مواد به‌صورت عمدی وارد بدنهٔ اصلی ملاط‌های تاریخی نشوند، ولی در حالت کلی حضور عمدی یا غیرعمدی افزودنی‌های آلی و معدنی باعث تغییراتی در کیفیت گچ خواهد شد. حتی امروزه نیز در شرکت‌های تجاری تولید گچ از افزودنی‌ها در جهت بهبود کیفیت گچ شرکت خود کمک می‌گیرند[15،59]. بخش بعدی در رابطه با افزودنی‌هایی که در متون یا مطالعات آزمایشگاهی در بناهای تاریخی از آن‌ها یادشده است، بیان خواهد شد.

٤-۲. معرفی افزودنی‌ها در ملاط‌های تاریخی

طبق استاندارد ISO 6707-1:20201 ملاط ماده‌ای با ترکیب چسب، پرکننده و آب را شامل می‌شود؛ این گفته می‌تواند علت خوبی برساخت ملاط با ترکیب‌های مختلف شود تا علاوه‌بر پوشاندن ضعف‌های ذاتی موادی مانند آهک و گچ، باعث بهبود کارایی ملاط نیز می‌شود. قبل از معرفی افزودنی‌ها در ملاط‌های تاریخی، مناسب است که تعریفی نسبت‌به کلمهٔ افزودنی ذکر گردد: افزودنی در ملاط ماده‌ای است که به ترکیب اصلی ملاط با درصد کم در جهت تغییر یا بهبود خواص ملحق می‌شود، طبق تعریف ذکرشده افزودنی‌هایی مانند شیر، کازئین، سفیده و زرده تخم‌مرغ، چسب‌های حیوانی، موم زنبورعسل، اوره، الیاف‌های گیاهی، ترکیبات منیزیم‌دار و حتی مواد پوزالانی را در ملاط‌ها کاربرد دارد[41,42,60,61]. این بخش علاوه‌بر معرفی افزودنی‌های قدیمی، مثال‌های موردی هرکدام از افزودنی در بناها ذکر می‌شود و جدول ۱ حضور برخی از افزودنی‌ها در بناهای تاریخی را بیان می‌کند.

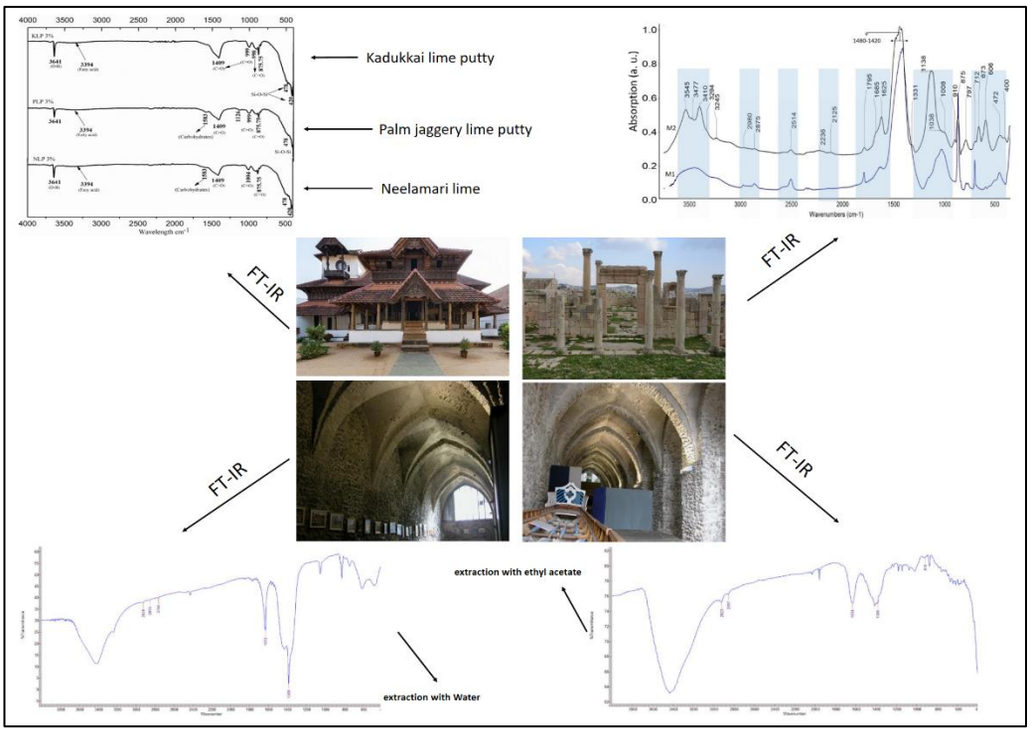
جدول ۱ معرفی برخی از افزودنی‌های مورداستفاده در ملاط‌های تاریخی
Table 1 introducing some additives used in historical mortars

نوع افزودنی Additive type	مثال از افزودنی‌ها An example of additives	مطالعهٔ موردی در آثار تاریخی A case study in historical works
مواد آلی Organic materials	کربوهیدرات‌ها (مانند درخت خرما و الوئه ورا) carbohydrates (such as palm tree and aloe vera)	ملاط آهکی بنای چنارمینار) هند[62] ملاط کاخ پادمانابهاپورام هند[63]، قلعه سولوپار هند [64] Limestone mortar of Chinarminar building, India [62] Mortar of Padmanabhapuram Palace, India [63]. Solupar Fort, India [64]
	پروتئین‌ها (به‌مانند سریشم و آلبومین) Proteins (such as Animal glue and albumin)	ملاط کلیسای صلیب مقدس گرسا در اردن[65]، ملاط گچی خواجه زین‌الدین ازبکستان [66]، آثار گچی دوره رنسانس ایتالیا در موزه استراسبورگ و لوور پاریس[67] The mortar of the Church of the Holy Cross in Gersa in Jordan [65], the plaster mortar of Khwaja Zainuddin Uzbekistan [66]. Plaster works of the Italian Renaissance period in the Strasbourg Museum and Paris Louvre[67]
	روغن‌ها و صمغ‌ها (روغن کتان و صمغ عربی) Oils and gums (linseed oil and gum)	ملاط بناهای تاریخی دورهٔ مینگ و سونگ در چین[۶۸]، ملاط ساختمان کشتی‌سازی آمالفی ایتالیا[۶۹] Mortar of historical monuments of the Ming and Song periods in China [68], the mortar of the Amalfi shipyard in Italy [69]
مواد معدنی minerals	اکسیدهای فلزی (مانند هماتیت) Metal oxides (such as hematite)	قلعه دولت‌آباد هندوستان[70] آب‌انبار قلعه آموئور اسپانیا[71] India's Dolatabad Castle[70] Spain's Amour Castle Reservoir[71]
	غیر فلزات (مانند خرده آجر-سفال) non-metals (such as Crushed brick - pottery)	ملاط قلعه پونسی انگلستان[61] Mortar of Pouncey Castle, England[61]

روغن بذر کتان طبق سندهای موجود در بناها کاربرد داشته است. برای مثال، در سال ۱۸۰۳ میلادی، دیوید فولچر ملاطی با ترکیب گچ، ماسه، شن و سرب سفید، لیتارژ طلا، روغن بذر کتان و تربانتین ساخته است که طبق نوشتهٔ اسناد قدیمی این ماده خاصیت ضدآبی را در ملاط ایجاد می‌کند و حتی در پژوهشی عملکرد این ماده برابر روی ملاط‌های ترمیمی بدون کاهش تخلخل باعث افزایش مقاومت و کاهش جذب رطوبت محیط در ملاط را تأیید می‌کند[72,73]. کازئین یکی دیگر از افزودنی‌هاست که بیشتر در مجسمه‌هایی که از جنس ملاط آهک ساخته شده‌اند، درگذشته کارکرد داشت. برای مثال، کازئین به‌عنوان پاتین در مجسمه آهکی کاخ گوئیجه نوئو بازان اسپانیا استفاده شده است. کلاژن نیز نوعی پروتئین بوده و در ملاط‌های تاریخی به‌مانند قلعهٔ نامست ند السو نیز به اثبات رسیده است[42]. در حالت کلی، چسب‌ها باعث افزایش قدرت پیوند میان ذرات داخل ملاط هستند که این امر بر بهبود کیفیت ملاط مناسب خواهد بود[74]. افزودنی‌هایی مانند آلبومین سفیده تخم‌مرغ، نیز در ملاط بناهای تاریخی بسیار دیده شده است. یکی از آن‌ها ملاط موجود در کلیسای صلیب گرسا در اردن است که پژوهشی حضور آلبومین را در این بنای تاریخی تأیید می‌کند[۶۵]؛ به‌نظر می‌رسد این مادهٔ آلی بیشتر به عملکرد اتصال‌دهی مواد بین ملاط تأثیر می‌گذارد[75]. موم زنبورعسل از دیگر افزودنی‌هایی است که به‌عنوان پوشش‌دهی ملاط‌ها کاربرد دارد. مثالی از این ماده، آب‌انبار قلعهٔ آموئور در اسپانیاست که برای ایجاد اندودی ضد آب از موم و عسل زنبور به‌عنوان پوشش‌دهی ملاط استفاده شده است. ناگفته نماند که مواد افزودنی در بناها بیشتر اوقات فراتر از استفادهٔ یک ماده خاص است. به‌همین منظور، ممکن است از چندین مادهٔ خاص افزودنی برای بهبود کارایی ملاط کمک گرفته باشد؛ آب‌انبار آموئور اسپانیا مثال مناسب برای این گفته است که در یک ملاط خاص از دو نوع افزودنی موم زنبورعسل و هماتیت استفاده شده است[71]. مواد معدنی نیز در ساخت ملاط بهینه کاربرد دارد؛ فناوری ملاط آهک و گچ در مناطق قبرس به دوران نوسنگی بازمی‌گردد؛ در این مناطق برای ساخت ملاط برای کاربرد بنایی از آجر خُردشده استفاده می‌کردند. کم‌بودن پوزلان‌های آتش‌فشانی دلیل اصلی این افزودنی بود[61،76]. در کل، معرفی همهٔ مواد افزودنی در بناهای تاریخی و تأثیر آن‌ها بر ملاط به این گفته‌ها خلاصه نشده و افزودنی‌هایی مانند خون، سرگین حیوانات و مواد فلزی مانند سُرب نیز در بناهای مختلف وجود دارد. در ارتباط ملاط‌های تاریخی برای شناسایی افزودنی‌ها پژوهش مؤثری در ایران واقع نشده است. به همین جهت

است که داده‌های جمع‌آوری‌شده بیشتر مناطق غیر از ایران را شامل می‌شوند. شکل ۷ برخی از بناهایی را که از افزودنی در ملاط خود استفاده کرده است، نشان می‌دهد.

نقش افزودنی‌ها در ملاط‌ها به‌قدری است که گاهی استفاده از ترکیبات مناسب از چندین ماده، نوع جدیدی از ملاط ایجاد می‌شود. مثال‌های این گفته شامل فن مرمری نما و لایه‌چینی است که هرکدام آن‌ها دارای جزءهای مختلفی است و در کارهای مختلف به‌عنوان اندود و تزئین استفاده می‌شود؛ در فن مرمری نما با ترکیب پودرهای ریز ژیپس و موادی مانند سریشم ترکیب‌شده که حاصل آن خمیری مورد استفاده برای اندود بناها تبدیل می‌شود و یا لایهٔ چینی که علاوه‌بر حضور سریشم به‌خصوص از نوع خرگوش موادی مانند منیزیا باعث تولید ملاط نرم شده و در خلق تزئینات گچ در سطح اندودها را فراهم می‌کند و بعد از خشک‌شدن مقاومت مناسبی را از خود بروز می‌دهد[77,78]. ملاط ساخته‌شده توسط دیوید وارک و جان لیاردت در سال ۱۷۷۳ میلادی مثالی دیگر از نقش افزودنی‌ها برای اندودهاست. آن‌ها ملاط با ترکیب گچ پاریس، سرب سفید یا قرمز، ماسه، مرمر و آجر خُردشده را ساخته و بلافاصله در بناهای مختلفی استفاده می‌کردند[61]. گفته‌های پیشین چندی از کاربرد افزودنی‌ها در ساخت و تهیهٔ انواع مختلف ملاط است؛ مرمتگر با شناخت فن‌های مختلف ساخت ملاط می‌تواند در بخش بازسازی و حتی حفاظت از آثار تاریخی با کمترین هزینه مناسب‌ترین مداخله را انجام دهد؛ به‌طوری‌که امروزه پژوهشگران از ملاط‌های سنتی برای بهبود مقاومت بناها در مقابل فعل‌وانفعالات طبیعی مانند زلزله کمک می‌گیرند[43]. علاوه‌بر موارد گفته‌شده یک‌سری افزودنی‌های امروزی هستند که دیگر پژوهشگران حوزهٔ مرمت و حفاظت و یا حتی حوزهٔ عمران آزمون‌های مختلفی برای شناخت تأثیر این افزودنی‌ها انجام داده‌اند که در بخش آینده این پژوهش تأثیر افزودنی‌های امروزی بر ملاط‌های ساختمانی مورد بحث قرار خواهد گرفت.



شکل ۷: بالا سمت چپ کاخ پادمانابهاپورام هند و وجود کربوهیدرات‌ها در ملاط بنا[63]. بالا سمت راست کلیسای صلیب گرسا در اردن و حضور آلبومین در ملاط آن [65]) و تصاویر پایین ساختمان کشتی‌سازی آمالفی ایتالیا و حضور پروتئین‌ها و روغن‌ها به‌عنوان افزودنی در ملاط بنا[69].

Fig. 7: top left side of India's Padmanabhapuram Palace and the presence of carbohydrates in the building mortar [63] top right side of the Grasa Cross Church in Jordan and the presence of albumin in its mortar [65]) and lower images of the Italian Amalfi shipyard building and the presence of proteins and oil as an additive in building mortar [69]

٤-٣ تأثیر افزودنی‌های امروزی بر کیفیت ملاط‌های گچ

گچ در تخلخل ۳۰-۵۰درصد وزنی دارای مقاومت فشاری تک‌محوری بین Mpa ۷-۱۸، مقاومت کششی Mpa ۶۳ و همچنین حلالیت بسیار بالا PKSP: ۴٫۶۲ را دارد. بر همین جهت، این ویژگی‌های گفته‌شده باعث کم‌رنگ‌شدن استفادهٔ گچ در بناها می‌گردد، ولی می‌توان به کمک موادی به‌عنوان افزودنی این ویژگی‌ها را بهبود داد؛ افزودنی‌هایی مانند سیلیکات‌ها، فسفات‌ها، پروتئین‌ها و از مهم‌ترین نوع بهبوددهنده در ملاط‌ها محسوب می‌شود[69,79,80].

برای بررسی تأثیر مواد افزودنی در ملاط‌ها مناسب است که نحوه تأثیر این‌گونه مواد به چندین بخش تقسیم شود؛ این تقسیم‌بندی می‌تواند شامل تأثیرهای مقاومتی[1]، تغییرات میزان جذب آب، چقرمگی، سرعت جذب آب (هیدراته شدن)، تثبیت‌کننده در عملیات حفاظتی و دیگر بخش‌های اثردهی باشد. ازاین‌رو، بررسی به‌صورت تأثیر افزودنی‌ها در تغییرات خواص در موارد گفته‌شده انجام خواهد گرفت. یک‌سری مواد افزودنی که مستقیم به‌عنوان تثبیت‌کننده در امر حفاظت و مرمت آثار تاریخی کاربرد دارد، ازجمله این مواد شامل پلیمرهای اکرلیکی، اپوکسی کو پلیمرها و حتی سیلکو ژل‌ها هستند. این مواد عملکرد قابل قبولی نیز دارند، ولی نمی‌توان از ضعفشان نیز چشم‌پوشی کرد. ازجملهٔ این نقص‌ها عدم آب‌گریزی کافی در پلیمرها و پوسته‌پوسته‌شدن بعد از خشک‌شدن سیلکوژل‌هاست؛ نانو ذرات آهک نیز یکی دیگر از تثبیت‌کننده‌های آثار گچی است که این مواد با پُرکردن فضاهای خالی باعث استحکام و تثبیت در آثار گچی می‌شود. استفاده از خاصیت کربنو ژنتیک باکتریایی نیز از دیگر روش‌های مناسب در جهت تثبیت و استحکام‌بخش ملاط‌ها محسوب می‌شود؛ روش کار این ماده به‌گونه‌ای است که بعد از نفوذ این ماده به درون ساختار ملاط، باکتری‌ها باعث القای کانی‌سازی در بخش متخلخل ماده ملاط می‌شود و این مکانیسم در این جنس از آثار که در حال پوسیده‌شدن و همچنین دارای ضعف ساختاری هستند، بسیار مناسب خواهد بود[79,81]. یکی از مهم‌ترین عامل در مقاومت ملاط‌های گچی میزان حضور آب در هنگام هیدراته‌شدن است، به‌طوری‌که هرچه میزان آب در ساختار ملاط بیشتر باشد، خواص مقاومتی این ماده نیز کاهش می‌یابد[82،83] با این گفته می‌توان نتیجه گرفت که برای ساخت یک ملاط با مقاومت بالا می‌بایست آب میان ساختاری کمتر شود، برخی از افزودنی‌های گچ برای هیدراته‌شدن میزان آب کمتری جذب می‌کند و درنتیجه مقاومت گچ را افزایش می‌دهد. لاتکس‌ها از افزودنی‌هایی محسوب می‌شوند که میزان آب را در زمان هیدراته‌شدن کاهش می‌دهند. مورد دیگر که باید گفته شود، اندازهٔ بلورهاست که با جذب کمتر آب باعث کاهش اندازهٔ بلورهای گچ می‌شود[84]. در پژوهشی افزودن چای سیاه را برای بهبود کیفیت گچ مناسب می‌داند و همچنین این مادهٔ قدیمی باعث کاهش میزان جذب آب در ملاط می‌شود[85]؛ سرعت هیدراته‌شدن گچ نیز تغییراتی در بلورها گچ ایجاد می‌کند، به‌طوری هرچه سرعت هیدراته‌شدن بیشتر باشد، بلورهای گچ بزرگ‌تر خواهد شد که برای کنترل سرعت هیدراته‌شدن افزودنی‌ها حائز اهمیت خواهند بود. برای مثال حضور نمک طعام و سولفات پتاسیم در گچ باعث تندگیرکردن گچ می‌شود[22,86,87]. نوع دیگر از افزودنی‌ها روان‌کننده و فوق روان‌کننده‌ها در ملاط‌های گچی هستند. این نوع افزودنی‌ها باعث کاهش جذب آب در ملاط شده و درنتیجه خواص مکانیکی گچ بهبود می‌یابد، چقرمگی دیگر ویژگی ایجادشده ملاط گچ است، به‌طوری‌که افزودن موادی ازجمله الیاف طبیعی (کنف) باعث افزایش بسیار جزئی چقرمگی در زمان‌گیرش گچ و همچنین کاهش ترک‌ها در ملاط خواهد شد[88،89]. پلیمرهای آلی و طبیعی با وزن مولکولی بالا، رزین‌های ملامین فرمالدئید سولفونه (SMF)، نفتالین فرمالدئید سولفونه (SNF)، انواع لاتکس و ترکیب پلیمرهای اکرلیکی به همراه الیاف طبیعی ازجمله افزودنی‌هایی هستند که در جهت بهبود خواص مکانیکی گچ و افزایش چقرمگی در زمان‌گیرش را برای گچ به ارمغان می‌آورند. شایان‌ذکر است که افزودن لاتکس و پلیمرهای اکرلیکی باعث ضد آب‌کردن ملاط گچ نیز خواهد شد[69,90-93]. انواع افزودنی در این گفته خلاصه نشده و برای آشکارسازی نقش دقیق افزودنی‌ها بر ملاط‌ها جدول ۲ ارائه می‌شود.

جدول ۲: معرفی برخی افزودنی‌ها برای ملاط‌ها و نوع تأثیر آن‌ها [104,109,108,93,91,90,89,85,84,73,22]

Table2: Introduction of some additives for mortars and their effects[104,109,108,93,91,90,89,85,84,73,22]

نام افزودنی Additives	تثبیت‌کننده Stabilizer	تأثیر مقاومتی Resistant impact	روان‌کننده Lubricant	سرعت هیدراته Hydration rate	میزان جذب آب Water absorption rate	زمان گیرش Setting time
پلیمرهای اکریلیکی Acrylic polymers	±	In	±	_____	De	_____
سیلکوژل‌ها/ Silca gels	+	In	_____	_____	_____	_____
نانو ذرات آهک Lime nanoparticles	+	In	_____	_____	De	_____
لاتکس‌ها/ Latexes	_____	In	+	_____	De	
پلی وینیل استات/pva	_____	In	_____	De	_____	In
چای سیاه/ black tea	_____	In	_____	DHv	De	PIn
نمک طعام/ salt	_____	_____	_____	De	_____	In
ماسه/ Sand	_____	In	-	_____	De	_____
الیاف کنف/ Hemp fibers	_____	In	_____	_____	_____	_____
ملامین فرمالدئید سولفونه sulfonated melamine-formaldehyde	_____	In	±	_____	_____	_____
خاکستر زیرین/bottom ash	_____	In	_____	De	In	In
اکسید منیزیم /Magnesium oxide	_____	In	_____	_____	_____	_____
آلومینو سیلکات Aluminum silicate	_____	In	_____	_____	De	_____
نانو کربوکسیلات اتر/ Nano carboxylate ether	±	In	±	_____	De	_____
استئارات آلومینیوم/ Aluminum stearate	_____	In	_____	_____	De	_____
خاکستر بادی/Fly ash	_____	In	_____	De	In	
نانولوله‌های کربنی/ Carbon nanotubes	-	In	_____	_____	De	_____
الیاف پرو پیلن/ Pro-pylon fibers	_____	In	_____	_____	_____	_____
ضایعات تنباکو/Tobacco waste	_____	In	_____	De	In	_____
اسیدسیتریک/ Citric acid	_____	De	_____	De	_____	In
پوزالان و سرباره‌های کوره/ Pozzallan &Furnace slag	_____	In	_____	De	De	In
انواع سیمان/Types of cement	_____	In	_____	_____	_____	_____
شلتوک/rice husk	_____	In	_____	De	_____	In
راهنمای جدول/Table guide	تا حدودی مثبت:±، Somewhat Positive : ± / مثبت: +، Positive : + / منفی:−، Negative: − / افزایشی:In، In: incremental / کاهشی: De، De: decrease/ در مقادیر بالا کاهشی: DHv ،PDe PDe :					

علاوه‌بر موارد گفته، طیف وسیع دیگر از مواد وجود دارند که هرکدام به نوع خود تأثیر بر کیفیت گچ می‌گذارند. برای مثال، استفاده از ماسه و خاک در ساختار ملاط گچ باعث جلوگیری از آسیب‌های رطوبتی می‌شود و نحوهٔ عملکرد آن بدین گونه است که با ترکیب خاک به گچ که به ملاط گچ‌وخاک معروف است، بافرهایی برای انتقال رطوبت در ساختار ملاط اندودهای گچی را ایجاد می‌کند[106,105]. افزودن آلومینو سیلیکات نیز باعث کاهش تخلخل در ملاط و درنتیجه، باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود[96]. مواد پوزلانی مانند دودهٔ خاکستر آتش‌فشانی نیز در جهت تغیر خواص گچ مؤثر است؛ افزودن سیلیس و خاکستر با افزایش مقاومت فشاری همراه است[107]. الیاف چوب‌پنبه و ماسه نیز در میزان غلظت مناسب در ملاط گچ بهبود کیفیت از منظر مقاومت فشاری خواهد داشت. عوامل زیادی برای تعیین کیفیت گچ وجود دارند که می‌بایست این افزودنی‌ها نسبت به نیاز مرمتگر و صنعتگر انتخاب شود؛ عایق صوتی نمونهٔ مناسبی برای شرح این گفته در شهرهای پرتردد است که یکی از عوامل آسیب هرچند جزئی برای آثار تاریخی محسوب می‌شود که استفاده از میکروسیلیکاها به‌عنوان پوشش‌دهی و یا افزودنی تاحدی از این عامل مخرب جلوگیری می‌کند[111].

۵. نتیجه‌گیری

پیرو آنچه در متن مقاله آمده است، ملاط گچ که از کهن‌ترین مصالح در ساخت‌وساز و آراستن بناهای تاریخی و فرهنگی بوده و هم‌اکنون نیز در معماری معاصر از پرکاربردترین آن‌هاست. شناخت خواص گچ ازنظر ساختاری و تغییرات ویژگی‌های کاربردی آن می‌تواند ذیل مهم‌ترین تخصص‌های حوزهٔ مطالعات میراث فرهنگی قرار گیرد. پیشینیان به تجربه دریافته‌اند گچ به‌مثابه ملاطی زودگیر که دارای محدودیت‌هایی در شرایط برودتی و رطوبتی مختلف هستند، می‌تواند با استفاده از مواد افزودنی دچار تغییر خواص و بهینه‌سازی کاربردی گردد و این تغییر خواص، ناشی از تغییر ساختار راهگشای شناسایی آن در مطالعات باستان‌سنجی و مرمت در رابطه با مواد تاریخی می‌تواند باشد. به‌علاوه، شناخت این مواد و قابلیت‌های آن‌ها می‌تواند در ارتقای کیفیت ملاط متناسب با شرایط مختلف در اقدامات امروزی مورد توجه قرار گیرد. برای بهینه‌سازی گچ سه عامل معدن، نحوهٔ پخت و افزودنی‌ها مهم‌ترین نقش را ایفا می‌کنند که بررسی هرکدام از این عوامل می‌تواند در جهت بهبود کیفیت گچ در شرایط مختلف مؤثر باشد. گفته‌های آینده مطالبی را که شامل محتوای مقاله است، بیان می‌کند: رشد بلور و دوقلوزایی یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در شکل و ساختار مواد رسوبی و بلوری بوده که ملاط‌های گچی نیز شامل این پدیده می‌شوند. علاوه‌بر موارد گفته‌شده نوع معدن و شرایط معدن به‌مانند میزان فشار، دما و pH نیز بر شکل و حتی ویژگی‌هایی مانند سختی و چگالی تأثیر می‌گذارد؛ اندازه و شکل بلور به‌شدت در خواص گچ تأثیر دارد. ازاین‌رو، بررسی بلوری در حوزهٔ باستان‌سنجی و حفاظت و مرمت می‌تواند اطلاعات ارزشمندی ارائه دهد. عامل دیگر، نحوهٔ پخت است که در این بخش نیز دما و فشار مهم‌ترین نقش را ایفا می‌کند، به‌طوری‌که مهیاسازی دماهای مختلف در کوره باعث تولید فازهای مختلفی از گچ می‌شود. افزودنی‌ها که این پژوهش تمرکز خاصی بر این موضوع انجام داده، از اصلی‌ترین عامل تعیین ویژگی‌های انواع ملاط‌ها به‌خصوص ملاط گچ است؛ با توجه به مطالعات انجام‌گرفته در این بخش مشخص شد که ملاط‌ها در بناهای تاریخی بیشتر نقاط جهان با افزودنی‌ها بهبود یافته‌اند. برای مثال، حضور آلبومین در ملاط بنای تاریخی صلیب گرسا در اردن تأیید شده است. در حالت کلی، افزودنی‌ها بر انواع مقاومت‌ها، میزان جذب آب و سرعت هیدراته‌شدن ملاط‌ها نقش دارد. حال آگاهی از این نوع افزودنی‌ها باعث افزایش تعداد انتخاب مواد مرمتی برای مرمتگر در جهت درمان آثار و تزئینات گچی خواهد شد.

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد حامد یعقوب‌زاده از دانشکدهٔ حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز است. در اینجا لازم است از این دانشگاه در جهت فراهم‌آوردن امکانات مادی و معنوی برای به‌عمل‌رسیدن این مقاله تقدیر گردد.

پی نوشت ها

۱. مقصود از تاثیر مقاومتی توجه به همه عوامل مانند مقاومت فشاری، خمشی و سایشی است(در صورت بهبود یکی‌از ویژگی‌های مقاومتی به کمک افزودنی‌ها واژه افزایش مقاومت استفاده می‌شود)

References

[1] Kamalizadeh, T & Kamalizadeh, M. Plastering of Khorasan doctrine. First Edition. Surah Mehr. Tehran.2015. [in Persian].
[کمالی زاده طاهره، کمالی زاده ابولقاسم. هنر گچبری مکتب خراسان. چاپ اول. سوره مهر.تهران.۱۳۹۴.]

[2] Bozorgmehri, Z& Khodadadi, A. Iranian Amood (cognition, pathology and restoration). Tehran: Soroush.2007[in Persian].
[بزرگ مهری زهره، خدادادی آناهیتا. آمودهای ایرانی(شناخت، آسیب شناسی و مرمت). سروش. تهران.۱۳۸۵.]

[3] Reza Zadeh Ardabili, M. "Restoration of architectural works (cognition, pathology, technology)". second edition. University of Tehran. Tehran.2017.[in Persian].
[رضا زاده اردبیلی مجتبی. مرمت آثار معماری(شناخت، آسیب شناسی و فن شناسی). چاپ دوم. دانشگاه تهران. تهران.۱۳۹۵.]

[4] Zumrashidi, H. Iranian Architecture - Traditional Materials Science. second edition. Zomorod. Tehran.2004. [in Persian].
[زمر شیدی حسین. معماری ایران (اجرای ساختمان با مصالح سنتی). چاپ دوم. زمرد. تهران.۱۳۸۲.]

[5] Pachta V, Stefanidou M, Konopisi S, Papayianni I. Technological evolution of historic structural mortars. Journal of Civil Engineering and Architecture. 2014 Jul 1;8(7). , ISSN 1934-7359, USA.

[6] Forotani, S.. Building Materials. Second Edition. Eighteenth Print. Rozaneh.Tehran.2017. [in Persian].
[فروتنی سام. مصالح ساختمانی. ویرایش دوم.چاپ هجدهم.روزنه.تهران.۱۳۹۵.]

[7] Ossorio M, Van Driessche AE, Pérez P, García-Ruiz JM. The gypsum–anhydrite paradox revisited. Chemical Geology. 2014 Oct 29;386:16-21. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.07.026

[8] Liu K, Han S, Gao W, Tang YN, Han X, Liu Z, Bao L, Zhi M, Wang H, Wang Y, Du H. Changes of Mineralogical Properties and Biological Activities of Gypsum and Its Calcined Products with Different Phase Structures. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine. 2021 Mar 10;2021. https://doi.org/10.1155/2021/6676797.

[9] Hami, A. Building Materials. Twenty-fifth edition. University of Tehran. Tehran.2020. [in Persian].
[حامی احمد. مصالح ساختمانی. چاپ بیست و پنجم. دانشگاه تهران. تهران. ۱۳۹۸.]

[10] Artioli G, Secco M, Addis A. The Vitruvian legacy: Mortars and binders before and after the Roman world. https://doi.org/10.1180/EMU-notes.20.4.

[11] Montana, G., & Ronca, F. (2002). The "recipe" of the stucco sculptures of Giacomo Serpotta. Journal of Cultural Heritage, 3(2), 133-144. https://doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01169-X

[12] Franzini M, Leoni L, Lezzerini M. A procedure for determining the chemical composition of binder and aggregate in ancient mortars: its application to mortars from some medieval buildings in Pisa. Journal of Cultural Heritage. 2000 Dec 1;1(4):365-73. https://doi.org/10.1016/S1296-2074(00)01092-X.

[13] Dadvar;A.,mohseni,Z & Mir Fattah,A.. Lime decorations art in Vakil bath in Shiraz. Islamic Iranian city, Issue 20.2015. [in Persian].
[دادور ابولقاسم، محسنی زهرا و میر سید علی اصغر میر فتاح. هنر آهک بری در حمام وکیل شیراز. مطالعات شهرهای ایرانی اسلامی.۵(۲۰).۱۳۹۴.]

[14] Yang F, Zhang B, Ma Q. Study of sticky

rice– lime mortar technology for the restoration of historical masonry construction. Accounts of chemical research. 2010 Jun 15;43(6):936-44. https://doi.org/10.1021/ar9001944.

[15] Yagubzadeh H & Razani M. A Review of the Chemical Structure, Applications & Methods of Identifying Casein Adhesives in Historical Properties. Studies in the world of color, 11(4),1-12.2022. [in Persian].
[یعقوب زاده حامد. رازانی مهدی. مروری بر ساختار، کاربرد و روش‌های شناسایی چسب کازئین در آثار تاریخی. مطالعات در دنیای هنر. (۴)۱۱. ۱-۱۲. ۱۴۰۱.]

[16] Zhu C, Xu X, Liu W, Xiong F, Lin Y, Cao C, Liu X. Softening damage analysis of gypsum rock with water immersion time based on laboratory experiment. IEEE Access. 2019 Sep 2;7:125575-85. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2939013

[17] Hass M, Sutherland GB. The infra-red spectrum and crystal structure of gypsum. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1956 Sep 11;236(1207):427-45. https://doi.org/10.1098/rspa.1956.0146

[18] Zha F, Qiao B, Kang B, Xu L, Chu C, Yang C. Engineering properties of expansive soil stabilized by physically amended titanium gypsum. Construction and Building Materials. 2021 Oct 11;303:124456. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124456.

[19] Lager GA, Armbruster T, Rotella FJ, Jorgensen JD, Hinks DG. A crystallographic study of the low-temperature dehydration products of gypsum, CaSO4· 2H2O: hemihydrate, CaSO4· 0.50 H2O, and γ-CaSO 4. American Mineralogist. 1984 Oct 1;69(9-10):910-9.

[20] Comodi P, Nazzareni S, Zanazzi PF, Speziale S. High-pressure behavior of gypsum: A single-crystal X-ray study. American Mineralogist. 2008 Oct 1;93(10):1530-7. https://doi.org/10.2138/am.2008.2917

[21] Oliveira ML, Flores EM, Dotto GL, Neckel A, Silva LF. Nanomineralogy of mortars and ceramics from the Forum of Caesar and Nerva (Rome, Italy): The protagonist of black crusts produced on historic buildings. Journal of Cleaner Production. 2021 Jan 1;278:123982. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123982.

[22] Behzadi Moghadam, N & Hassanzadeh Gucci, J. Gypsum Engineering: Applied Handbook for Students and Quality Managers. Tehran: Sanabad.2015. [in Persian].
[بهزادی مقدم نرجس، حسن زاده گوجی جواد. مهندسی گچ (هند بوک کاربردی دانشجویان و مدیران کیفیت). سند باد. تهران. ۱۳۹۴.]

[23] Rubbo M, Massaro FR, Aquilano D, Vanzetti W. Morphology of gypsum: a case study. Crystal Research and Technology. 2011 Aug;46(8):779-83. https://doi.org/10.1002/crat.201000601

[24] MISHMASTNEHI M. The Application of Crystallographic Interpretation on Technical Study of Gypsum-Based Historical Materials (Case studies of stucco decoration of Kuh-e Khwaja and Gypsum Mortars from Shadiakh and Alamut). JOURNAL OF RESEARCH ON ARCHAEOMETRY.1(2).1-14.2015.20.1001.1.24764647.2015.1.2.5.6[in Persian].
[میش مست نهی محسن. کاربرد تحلیل های بلورشناسی در مطالعات فنی آثار تاریخی گچی (مطالعه ی موردی گچ بری کوه خواجه ی سیستان، ملات گچ شادیاخ نیشابور و ملات گچ قلعه الموت قزوین).پژوهه باستان سنجی. ۱(۲).۱۳۹۴.]

[25] Aquilano D, Otálora F, Pastero L, García-Ruiz JM. Three study cases of growth morphology in minerals: Halite, calcite and gypsum. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. 2016 Jun 1;62(2):227-51. https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2016.04.012

[26] Aquilano D, Otálora F, Pastero L, García-Ruiz JM. Three study cases of growth morphology in minerals: Halite, calcite and gypsum. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. 2016 Jun 1;62(2):227-51. https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2016.04.012

[27] Hargis CW, Kirchheim AP, Monteiro PJ, Gartner EM. Early age hydration of calcium sulfoaluminate (synthetic ye'elimite, C4A3S) in the presence of gypsum and varying amounts of calcium hydroxide. Cement and Concrete Research. 2013 Jun 1;48:105-15. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.03.001

[28] Pinto AJ, Jimenez A, Prieto M. Interaction of phosphate-bearing solutions with gypsum: Epitaxy and induced twinning of brushite (CaHPO4· 2H2O) on the gypsum cleavage surface. American Mineralogist. 2009 Feb 1;94(2-3):313-22. https://doi.org/10.2138/am.2009.3046

[29] Vogel MB, Des Marais DJ, Parenteau MN, Jahnke LL, Turk KA, Kubo MD. Biological influences on modern sulfates: Textures and composition of gypsum deposits from Guerrero Negro, Baja California Sur, Mexico. Sedimentary Geology. 2010 Jan 15;223(3-4):265-80. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2009.11.013

[30] Al-Youssef M. Gypsum Crystals Formation and Habits, Umm Said Sabkha, Qatar. InSabkha ecosystems 2014 (pp. 23-54). Springer, Dordrecht. DOI: 10.1007/978-94-007-7411-7_2

[31] Rubbo M, Bruno M, Massaro FR, Aquilano D. The five twin laws of gypsum (CaSO4· 2H2O): a theoretical comparison of the interfaces of the contact twins. Crystal growth & design. 2012 Jan 1;12(1):264-70. https://doi.org/10.1021/cg201031s

[32] Brunton PA, Davies RP, Burke JL, Smith A, Aggeli A, Brookes SJ, Kirkham J. Treatment of early caries lesions using biomimetic self-assembling peptides–a clinical safety trial. British dental journal. 2013 Aug;215(4):E6-. https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2013.741

[33] Van Jaarsveld F. Characterising and mapping of wind transported sediment associated with opencast gypsum mining (Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University).

[34] Herron MM, Matteson A. Elemental composition and nuclear parameters of some common sedimentary minerals. Nuclear Geophysics. 1993;7(3):383-406. ISSN 0969-8086

[35] Bohacs KM, Carroll AR, Neal JE, Mankiewicz PJ, Gierlowski-Kordesch EH, Kelts KR. Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: an integrated sequence-stratigraphic-geochemical framework. Lake basins through space and time: AAPG Studies in Geology. 2000 Jan 1;46:3-4.

[36] Al Heib MM, Didier C, Masrouri F. Improving short-and long-term stability of underground gypsum mine using partial and total backfill. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2010 Jul;43(4):447-61. https://doi.org/10.1007/s00603-009-0066-9

[37] Schmid T, Jungnickel R, Dariz P. Insights into the CaSO4–H2O system: A Raman-spectroscopic study. Minerals. 2020 Jan 29;10(2):115. https://doi.org/10.3390/min10020115

[38] Copsey N. Hot Mixed Lime and Traditional Mortars: A Practical Guide to Their Use in Conservation and Repair. The Crowood Press; 2019 Mar 25.

[39] [Weyer A, Roig Picazo P, Pop D, Cassar J, Özköse A, Vallet JM, Srša I. EwaGlos-European illustrated glossary of conservation terms for wall paintings and architectural surfaces. Michael Imhof Verlag; 2015. ISBN 978-3-7319-0260-7.

[40] Arizzi A, Cultrone G. Mortars and plasters—how to characterise hydraulic mortars. Archaeological and Anthropological Sciences. 2021 Sep;13(9):1-22. https://doi.org/10.1007/s12520-021-01404-2

[41] Gliozzo E, Pizzo A, La Russa MF. Mortars, plasters and pigments—research questions and sampling criteria. Archaeological and Anthropological Sciences. 2021 Nov;13(11):1-30. https://doi.org/10.1007/s12520-021-01393-2

[42] Frederiksen R, Marchand E, editors. Plaster casts: making, collecting and displaying from classical antiquity to the present. Walter de Gruyter; 2010 Sep 27.

[43] Caroselli M, Ruffolo SA, Piqué F. Mortars and plasters—how to manage mortars and plasters conservation. Archaeological

and Anthropological Sciences. 2021 Nov;13(11):1-20. https://doi.org/10.1007/s12520-021-01409-x

[44] Ergenç D, Fort R, Alvarez de Buergo M. Mortars and plasters—How to characterize aerial mortars and plasters. Archaeological and Anthropological Sciences. 2021 Nov;13(11):1-28. https://doi.org/10.1007/s12520-021-01398-x

[45] Sadeghiamirshahidi M, Vitton SJ. Laboratory study of gypsum dissolution rates for an abandoned underground mine. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019 Jul;52(7):2053-66. https://doi.org/10.1007/s00603-018-1696-6

[46] Bel-Anzué P, Elert K. Changes in traditional building materials: the case of gypsum in Northern Spain. Archaeological and Anthropological Sciences. 2021 Oct;13(10):1-7. https://doi.org/10.1007/s12520-021-01438-6.

[47] Oudbashi O, Shekofte A. Traditional methods of gypsum production in province of Khuzestan, southwest of Iran. InHMC08, Historical Mortars Conference Characterization, Diagnosis, Conservation, Repair and Compatibility 2008.

[48] Bel-Anzué P, Almagro A, Pérez MP, Rodriguez-Navarro C. Influence of the calcination process in traditional gypsum with structural behavior. Ge-conservación. 2017 Jun 30;11:79-85.

[49] Vegas F, Mileto CA, Fratini FA, Rescic SI. May a building stand upon gypsum structural walls and pillars? The use of masonry made of gypsum in traditional architecture in Spain. Proceeding of the Eight International Masonry. 2010:2183-92.

[50] Yilmaz I. Differences in the geotechnical properties of two types of gypsum: alabastrine and porphyritic. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2007 May;66(2):187-195. https://doi.org/10.1007/s10064-006-0055-0

[51] A Hatim NA, Al-Khayat IK, Abdulla MA. Modification of gypsum products (Part I): physical and mechanical properties of adding some additives on different types of gypsum products. Al-Rafidain Dental Journal. 2007 Jun 1;7(2):206-12.

[52] Badens E, Veesler S, Boistelle R. Crystallization of gypsum from hemihydrate in presence of additives. Journal of Crystal Growth. 1999 Mar 1;198:704-9. https://doi.org/10.1016/S0022-0248(98)01206-8

[53] Winnefeld F, Martin LH, Müller CJ, Lothenbach B. Using gypsum to control hydration kinetics of CSA cements. Construction and Building Materials. 2017 Nov 30;155:154-63. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.217

[54] Singh NB. The activation effect of K2SO4 on the hydration of gypsum anhydrite, CaSO4 (II). Journal of the american ceramic society. 2005 Jan;88(1):196-201. https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2004.00020.x

[55] Sievert T, Wolter A, Singh NB. Hydration of anhydrite of gypsum (CaSO4. II) in a ball mill. Cement and concrete research. 2005 Apr 1;35(4):623-30. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.010

[56] Golež M, Pogačnik Ž, Mladenović A. Laboratory-prepared lime-gypsum mixtures based on the know-how of traditional technology. Journal of Cultural Heritage. 2018 Jul 1;32:38-43. https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.02.011

[57] La Spina V. Study of traditional gypsum in Spain: Methodology and initial results. InBuilding Knowledge, Constructing Histories 2018 Jul 11 (pp. 829-836). CRC Press. 9780429446719

[58] Caselle C, Bonetto S, Vagnon F, Costanzo D. Dependence of macro mechanical behaviour of gypsum on micro-scale grain-size distribution. Géotechnique Letters. 2019 Dec;9(4):290-8. https://doi.org/10.1680/jgele.18.00206

[59] Sika Group. (It has no date)Additives for Dry Mortar & Gypsum. https://www.sika.com/en/construction

/gypsum-dry-mortar.html.
[60] Raghunathan T. Recent Research of Lime Mortar and FAL-G with Urea. Advanced Aspects of Engineering Research Vol. 14. 2021 May 20:98-103. Print ISBN: 978-93-91215-88-0, eBook ISBN: 978-93-91215-89-7
[61] Ashurst J, Ashurst N. Practical building conservation. Vol. 3: mortars, plasters and renders. 1988.
[62] Ravi R, Thirumalini S, Taher N. Analysis of ancient lime plasters–Reason behind longevity of the Monument Charminar, India a study. Journal of Building Engineering. 2018 Nov 1;20:30-41. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.04.010
[63] Shivakumar M, Selvaraj T, Dhassaih MP. Preparation and characterization of ancient recipe of organic Lime Putty-Evaluation for its suitability in restoration of Padmanabhapuram Palace, India. Scientific reports. 2021 Jun 24;11(1):1-20. https://doi.org/10.1038/s41598-021-91680-8
[64] Dighe B, Singh M, Karche T. Traditional use of organic additives (bamboo foliage, flax fibre and millet grains) in 16th century lime plaster of Solapur Fort, India. http://nopr.niscpr.res.in/handle/123456789/56297
[65] Al Sekhaneh W, Shiyyab A, Arinat M, Gharaibeh N. Use of FTIR and thermogravimetric analysis of ancient mortar from The Church of the Cross in Gerasa (Jordan) for conservation purposes. Mediterranean Archaeology and Archaeometry. 2020 Jan 1;20(3):159-74. DOI: 10.5281/zenodo.4016073
[66] Badr J, Huck-Stiasny C, Drewello R. Gypsum Mortars of the Khoja Zainuddin Mosque in Bukhara (Uzbekistan)–A Contribution to Building Archaeological Studies. In2nd Conference on Historic Mortars-HMC 2010 and RILEM TC 203-RHM final workshop 2010 (pp. 3-10). RILEM Publications SARL.
[67] Aksamija A, Nowik W, Lehuédé P, Le Hô AS, Bormand M, Bouquillon A. Investigation of organic additives in Italian Renaissance devotion stucco reliefs from French collections. Journal of Cultural Heritage. 2019 Sep 1;39:66-81. https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.03.012.
[68] Li J, Zhang B. Why ancient Chinese people like to use organic–inorganic composite mortars?—Application history and reasons of organic–inorganic mortars in ancient Chinese buildings. Journal of Archaeological Method and Theory. 2019 Jun;26(2):502-36. https://doi.org/10.1007/s10816-018-9380-4
[69] Rampazzi L, Colombini MP, Conti C, Corti C, Lluveras-Tenorio A, Sansonetti A, Zanaboni M. Technology of medieval mortars: an investigation into the use of organic additives. Archaeometry. 2016 Feb;58(1):115-30. https://doi.org/10.1111/arcm.12155
[70] Singh M, Vinodh Kumar S. Mineralogical, chemical, and thermal characterizations of historic lime plasters of thirteenth–sixteenth-century Daulatabad Fort, India. Studies in Conservation. 2018 Nov 17;63(8):482-96. https://doi.org/10.1080/00393630.2018.1457765
[71] Ponce-Antón G, Zuluaga MC, Ortega LA, Agirre Mauleon J. Petrographic and Chemical–Mineralogical Characterization of Mortars from the Cistern at Amaiur Castle (Navarre, Spain). Minerals. 2020 Mar 31;10(4):311. https://doi.org/10.3390/min10040311.
[72] Cechova E. The effect of linseed oil on the properties of lime-based restoration mortars.2009. DOI 10.6092/unibo/amsdottorato/2267.
[73] ORATTAN G, JONES JR, COMPTON W. VOLUME XVIL-NO. 48. HARRISONBURG, VA., THURSDAY, SEPTEMBER 14, 1882.
[74] Pintea AO, Manea DL. New types of mortars obtained by aditiving traditional mortars with natural polymers to increase physico-mechanical performances. Procedia Manufacturing. 2019 Jan 1;32:201-7. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.203
[75] Binici H, Resatoglu R, Aksogan O. Effect of egg white, perlite, gypsum and fly ash in environment friendly insulation materials. Facta Universitatis. Series: Architecture

and Civil Engineering. 2019 Jan 24:329-42. ISSN 2406-0860 (Online)

[76] Philokyprou M. The earliest use of lime and gypsum mortars in Cyprus. InHistoric Mortars 2012 (pp. 25-35). Springer, Dordrecht. DOI: 10.1007/978-94-007-4635-0_3

[77] Brunello V, Bersani D, Rampazzi L, Sansonetti A, Tedeschi C. Gypsum based mixes for conservation purposes: Evaluation of microstructural and mechanical features. Materiales de Construcción. 2020 Mar 30;70(337):e207-. DOI: 10.3989/mc

[78] Monaco M, Aurilio M, Tafuro A, Guadagnuolo M. Sustainable mortars for application in the cultural heritage field. Materials. 2021 Jan 27;14(3):598. https://doi.org/10.3390/ma14030598

[79] Jroundi F, Gonzalez-Muñoz MT, Garcia-Bueno A, Rodriguez-Navarro C. Consolidation of archaeological gypsum plaster by bacterial biomineralization of calcium carbonate. Acta biomaterialia. 2014 Sep 1;10(9):3844-54. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2014.03.007

[80] Çolak A. Density and strength characteristics of foamed gypsum. Cement and Concrete Composites. 2000 Jun 1;22(3):193-200. https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00008-1

[81] Palomo A, Blanco-Varela MT, Martinez-Ramirez S, Puertas F, Fortes C. Historic mortars: characterization and durability. New tendencies for research. InAdvanced Research Centre for cultural heritage interdisciplinary projects, Fifth Framework Programme Workshop 2002 Feb 4.

[82] Wong LN, Jong MC. Water saturation effects on the Brazilian tensile strength of gypsum and assessment of cracking processes using high-speed video. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2014 Jul;47(4):1103-15. https://doi.org/10.1007/s00603-013-0436-1

[83] Vegas F, Mileto C, Ivorra S, Baeza F. Checking gypsum as structural material. InApplied Mechanics and Materials 2012 (Vol. 117, pp. 1576-1579). Trans Tech Publications Ltd. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.117-119.1576

[84] Sakthieswaran N, Sophia M. Effect of superplasticizers on the properties of latex modified gypsum plaster. Construction and Building Materials. 2018 Aug 10;179:675-91. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.150.

[85] Huang Y, Xu C, Li H, Jiang Z, Gong Z, Yang X, Chen Q. Utilization of the black tea powder as multifunctional admixture for the hemihydrate gypsum. Journal of Cleaner Production. 2019 Feb 10;210:231-7. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.304

[86] Lewry AJ.Williamson J. The setting of gypsum plaster. Journal of materials science. Dec;29(23):6085-6090.1984

[87] Rodríguez-Navarro C. Binders in historical buildings: Traditional lime in conservation. Semin. SEM. 2012 Jun;9:91-112. ISSN 1698-5478

[88] Moropoulou A, Bakolas A, Anagnostopoulou S. Composite materials in ancient structures. Cement and concrete composites. 2005 Feb 1;27(2):295-300. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.018

[89] Iucolano F, Liguori B, Aprea P, Caputo D. Evaluation of bio-degummed hemp fibers as reinforcement in gypsum plaster. Composites Part B: Engineering. 2018 Apr 1;138:149-56. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.037

[90] Tarannum N, Pooja KM, Khan R. Preparation and applications of hydrophobic multicomponent based redispersible polymer powder: A review. Construction and Building Materials. 2020 Jun 30;247:118579. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118579.

[91] Ustinova YV. Influence of the polymeric additives on the process of calcium sulfatedihydrate crystallization. InE3S Web of Conferences 2020 (Vol. 220, p. 01035). EDP Sciences.

[92] Janus M, Zatorska J, Zając K, Kusiak-

Nejman E, Czyżewski A, Morawski AW. The mechanical and photocatalytic properties of modified gypsum materials. Materials Science and Engineering: B. 2018 Oct 1;236:1-9. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2018.11.015.

[93] Pundir A, Garg M, Singh R. Evaluation of properties of gypsum plaster-superplasticizer blends of improved performance. Journal of Building Engineering. 2015 Dec 1;4:223-30. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.09.012.

[94] Khalil AA, Tawfik A, Hegazy AA, El-Shahat MF. Effect of some waste additives on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites. Construction and building materials. 2014 Oct 15;68:580-6. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.081.

[95] Abbood AA, Atshan AF, AL-Ridha AS. Improvement of Local Gypsum Plaster Setting Time by the Combined Usage of (TGP) and (PVA) Additives. InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020 Jun 1 (Vol. 870, No. 1, p. 012106). IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/870/1/012106

[96] Benjeddou O, Soussi C, Benali M, Alyousef R. Experimental Investigation of a New Ecological Block Made by Mixing Gypsum Plaster and Desert Sand. Arabian Journal for Science and Engineering. 2020 May;45(5):4037-52. https://doi.org/10.1007/s13369-020-04362-4.

[97] Chindaprasirt P, Boonserm K, Chairuangsri T, Vichit-Vadakan W, Eaimsin T, Sato T, Pimraksa K. Plaster materials from waste calcium sulfate containing chemicals, organic fibers and inorganic additives. Construction and Building Materials. 2011 Aug 1;25(8):3193-203. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.004.

[98] Hashempour M, A Samani A, Heidari A. Essential Improvements in Gypsum Mortar Characteristics. International Journal of Engineering. 2021 Feb 1;34(2):319-25. 10.5829/IJE.2021.34.02B.03

[99] Ma L, Xie Q, Evelina A, Long W, Ma C, Zhou F, Cha R. The effect of different additives on the hydration and gelation properties of composite dental gypsum. Gels. 2021 Aug 11;7(3):117. https://doi.org/10.3390/gels7030117

[100] 100Buryanov AF. Water-resistant gypsum compositions with man-made modifiers. Procedia Engineering. 2017 Jan 1;172:867-74. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.087.

[101] Romero-Gómez MI, Pedreño-Rojas MA, Pérez-Galvez F, Rubio-de-Hita P. Characterization of gypsum composites with polypropylene fibers from non-degradable wet wipes. Journal of Building Engineering. 2021 Feb 1;34:101874. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101874

[102] Camarini G, Pinto MC, de Moura AG, Manzo NR. Effect of citric acid on properties of recycled gypsum plaster to building components. Construction and Building Materials. 2016 Oct 15;124:383-90. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.112.

[103] Magallanes-Rivera RX, Juarez-Alvarado CA, Valdez P, Mendoza-Rangel JM. Modified gypsum compounds: An ecological–economical choice to improve traditional plasters. Construction and building materials. 2012 Dec 1;37:591-6. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.054.

[104] Chernyshova N, Lesovik V, Fediuk R, Timokhin R. Enhancement of fresh properties and performances of the eco-friendly gypsum-cement composite (EGCC). Construction and Building Materials. 2020 Nov 10;260:120462. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120462

[105] Cascione V, Maskell D, Shea A, Walker P, Mani M. Comparison of moisture buffering properties of plasters in full scale simulations and laboratory testing. Construction and Building Materials. 2020 Aug 20;252:119033. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119033

[106] Santos T, Gomes MI, Silva AS, Ferraz E, Faria P. Comparison of mineralogical, mechanical and hygroscopic characteristic of earthen, gypsum and cement-based plasters. Construction and Building Materials. 2020 Sep 10;254:119222. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119222

[107] Sai AN, Ramadoss R. A review on role of additives & pozzolanic materials in ancient structures. Materials Today: Proceedings. 2021 Jan 1;43:1383-8. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.173

[108] Khalil AA, Tawfik A, Hegazy AA, El-Shahat MF. Effect of different forms of silica on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites. Materiales de construcción. 2013 Dec 30;63(312):529-37.

[109] D'Armada P, Hirst E. Nano-lime for consolidation of plaster and stone. Journal of architectural conservation. 2012 Jan 1;18(1):63-80. https://doi.org/10.1080/13556207.2012.10785104.

[110] Jean Chardin. Chardin's Travel Letter. Translated by Iqbal Yaghmaei. second edition.Tos.Tehran.2014.

[111] Arroyo FN, Christoforo AL, Salvini VR, Pelissari PI, Pandolfelli VC, Luz AP, Cardoso CA. Development of plaster foam for thermal and acoustic applications. Construction and Building Materials. 2020 Nov 30;262:120800. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120800